

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Analýza digitálně modulovaných signálů

Analysis of Digitally Modulated Signals

2013

Bc. Michal Lastomírský

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Lastomírský**
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika
Téma: **Analýza digitálně modulovaných signálů**
Analysis of Digitally Modulated Signals

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.
- 2) Přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.
- 3) Blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.
- 4) Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.
- 5) Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.
- 6) Vyhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] CLARK, Cory L. LabVIEW digital signal processing and digital communications. New York: McGraw-Hill, 2005. ISBN 00-714-6966-4
- [2] LINNARTZ, Tim Schenk and Jean-Paul. RF imperfections in high-rate wireless systems impact and digital compensation. Online-Ausg. Dordrecht: Springer, 2008. ISBN 978-140-2069-031.
- [3] HICKMAN, Ian. Practical radio-frequency handbook. 4th ed. Oxford: Newnes, 2007. ISBN 978-0-7506-8039-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Žídek, CSc.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 6.5.2013


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval “*doc. Ing. Janu Žídkovi CSc.*“ za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá popisem digitálně modulovaného signálu a jeho využití v moderních telekomunikačních sítích. Jsou zde rozebrány jednotlivé vlivy, které degradují signál v reálném přenosovém kanále. Dále práce pojednává o přístrojích a nástrojích, které se používají pro měření digitálně modulovaného signálu, srovnání klasické a virtuální instrumentace. Diplomová práce obsahuje blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného systému. Praktická část diplomové práce je zaměřena na návrh aplikace, která slouží pro měření digitálně modulovaného signálu. Následně bylo v diplomové práci navrženo několik měření degradačních vlivů, které negativně působí na digitálně modulovaný signál s využitím navržené aplikace.

Klíčová slova

Digitální signál; digitální modulace; bezdrátový přenos dat; RM OSI; chyby signálu; signál vektorový analyzátor; LabVIEW; telekomunikační síť.

Abstract

This thesis describes digitally modulated signals and use of digitally modulated signal in the modern telecommunications networks. Various factors that degrade the signal in the real transmission channel are analyzed here. The thesis also discusses about the equipment and tools that are used to measure the digitally modulated signals, and also thesis comparison between classical and virtual instrumentation. The thesis shows a flowchart of the analysis of digitally modulated system. The practical part of the thesis is focused on the development and design application that is used to analyze the digitally modulated signals. The thesis subsequently proposed several measurements of degradation effects, which affect the digitally modulated signal by using the designed application.

Key words

Digital signal; digital modulation; wireless data transmission; RM OSI; error signal; vector signal analyzer; LabVIEW; telecommunication network;

Seznam použitých symbolů

| Symbol | Jednotky | Význam symbolu |
|------------------------|----------|---|
| T | Bd | Modulační rychlost |
| f | Hz | Frekvence |
| t | s | Čas |
| β | - | Roll-off faktor |
| v_{\max} | % | Odstranění závislosti na zesílení distribučního systému |
| $V_{\text{přenosová}}$ | b/s | Přenosová rychlost |
| $V_{\text{modulační}}$ | Bd | Modulační rychlost |
| T_s | Bd | Symbolová rychlost |
| e | - | Chybový vektor |
| $\varphi(t)$ | ° | Fázový posuv |
| w | - | Přijatý sobolový vektor |
| v | - | Ideální symbolový vektor |
| I_t | - | Ideální velikost složky I |
| Q_t | - | Ideální velikost složky Q |
| $h(t)$ | - | Impulzní odezva filtru |
| $H(f)$ | - | Chování filtru ve frekvenční oblasti |
| Δf | Hz | Přebytečná šířka pásma |
| n | - | Počet možných stavů |
| δI_t | - | Rozdíl velikostí přijaté složky I od ideální složky I |
| δQ_t | - | Rozdíl velikostí přichozí složky Q od ideální složky Q |

Seznam použitých zkratk

| Zkratka | Anglický význam | Český význam |
|---------------|--|---|
| RM OSI | Open Systems Interconnection | Propojení otevřených systémů |
| ISO | International Organization for Standardization | Mezinárodní organizace pro standardizaci |
| Wi-fi | Wireless Fidelity | Komunikační standart pro bezdrátový přenos dat |
| EDGE | Enhanced Data rates for GSM Evolution | Technologie rozšiřující možnosti telekomunikační sítě GSM |
| GSM | Global System for Mobile Communications | Globální Systém pro Mobilní komunikaci |
| GPRS | General Packet Radio Services | Služba pro přenos dat v sítích GSM |
| SRRC | Square Root Raised Cosine Filter | Square Root Raised Cosine Filtr |
| RRC | Root Raised Cosine Filter | Root Raised Cosine Filtr |
| RC | Raised Cosine Filter | Raised Cosine Filtr |
| Q | Quadrature-phase | Q složka fázoru I/Q modulace |
| I | In-phase | I složka fázoru I/Q modulace |
| PSK | Phase Shift Keying | Fázová digitální modulace |
| FSK | Frequency Shift Keying | Frekvenční digitální modulace |
| ASK | Amplitude Shift Keying | Amplitudová digitální modulace |
| PM | Phase Modulation | Fázová analogová modulace |
| FM | Frequency Modulation | Frekvenční analogová modulace |
| AM | Amplitude Modulation | Amplitudová analogová modulace |
| PXI | PCI Extensions for Instrumentation | Otevřený standart pro modulární měřicí přístroje |
| MXI | Multisystem eXtension Interface | Softwarově transparentní linka |
| GMSK | Gaussian Minimum Shift Keying | Druh MSK modulace |
| MSK | Minimum Shift Keying | Typ digitální modulace |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System | Typ telekomunikační sítě |
| QAM | Quadrature amplitude modulation | Druh digitální modulace |
| HSDPA | High-Speed Downlink Packet Access | Protokol pro mobilní telefonii |
| MER | Modulation Error Ratio | Modulační chyba |

| | | |
|------------|----------------------------|---|
| EVM | Error Vector Magnitude | Amplituda chybového vektoru |
| RF | Radio-Frequency | Radiový signál |
| GPS | Global Positioning system | Globální družicový polohový systém |
| PAM | Pulse Amplitude Modulation | Pulsní amplitudová modulace |
| VI | Virtual Instruments | Programy jejich vzhled a činnost připomínají skutečné přístroje |
| RMS | Root Mean Square | Efektivní hodnota |
| MT | Modulation Toolkit | Modulation Toolkit |
| DFT | Discrete Fourier transform | Diskrétní Fourierova transformace |
| DDC | Digital Downconvertor Chip | Digitální čip pro downkonverzi |

Obsah

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 1 |
| 2 | Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů..... | 2 |
| 2.1 | Vývoj signálu | 2 |
| 2.2 | Vývoj přenosových medií..... | 2 |
| 2.3 | Komunikace mezi zařízeními | 3 |
| 2.4 | RM OSI | 3 |
| 2.5 | Fyzická vrstva RM OSI..... | 4 |
| 2.6 | Modulace..... | 4 |
| 2.7 | Digitální modulace | 5 |
| 2.8 | Vztah mezi modulační a přenosovou rychlostí..... | 5 |
| 2.9 | I/Q modulace | 6 |
| 2.9.1 | Vektorový diagram..... | 7 |
| 2.9.2 | Konstelační diagram..... | 7 |
| 2.10 | Frekvenční filtrace v digitálně modulovaných signálech | 7 |
| 2.11 | Digitální modulace používané v moderních telekomunikačních sítích..... | 10 |
| 2.11.1 | GSM | 10 |
| 2.11.2 | EDGE | 10 |
| 2.11.3 | UMTS | 11 |
| 2.11.4 | Degradační vlivy signálu | 11 |
| 2.11.5 | Vícecestné šíření..... | 12 |
| 2.11.6 | Únik | 12 |
| 2.11.7 | Chyba Amplitudy | 12 |
| 2.11.8 | Rozdíl amplitud I a Q složky signálu | 12 |
| 2.11.9 | Chyba fáze – jitter a wander | 12 |
| 2.12 | Způsoby vyhodnocení degradačních vlivů signálu | 13 |
| 2.12.1 | MER (Modulation Error Ratio) | 13 |
| 2.12.2 | EVM (Error Vector Magnitude)..... | 14 |
| 3 | Přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast..... | 15 |
| 3.1 | Vývoj klasické instrumentace..... | 15 |
| 3.1.1 | Spektrální měření..... | 15 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1.2 | Měření vysokofrekvenčního výkonu | 15 |
| 3.1.3 | Osciloskop | 16 |
| 3.2 | Virtuální instrumentace | 18 |
| 4 | Blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit. | 21 |
| 4.1 | Realizace přijímací části přenosového řetězce pomocí virtuální instrumentace. | 22 |
| 4.2 | Grafické programování..... | 22 |
| 4.3 | Blokové schéma pro zpracování přijímaného digitálně modulovaného signálu implementovaného do grafického vývojového prostředí LabVIEW | 23 |
| 5 | Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému. | 25 |
| 5.1 | Popis jednotlivých bloků programu v blokovém diagramu..... | 25 |
| 5.1.1 | Blok pro specifikaci modulačního schématu | 25 |
| 5.1.2 | Blok pro nastavení analyzátoru | 26 |
| 5.1.3 | Blok pro příjem, měření a demodulaci signálu..... | 27 |
| 5.2 | Popis jednotlivých bloků programu v uživatelském prostředí | 29 |
| 5.2.1 | Blok nastavení analyzátoru..... | 29 |
| 5.2.2 | Blok pro vizuální vyobrazení naměřených hodnot | 30 |
| 5.2.3 | Blok pro zobrazení naměřených parametrů signálu | 32 |
| 6 | Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu..... | 34 |
| 6.1 | Měřicí soustava..... | 34 |
| 6.2 | Měření vlivu bílého šumu..... | 35 |
| 6.3 | Měření vlivu fázového šumu | 37 |
| 6.4 | Měření vlivu chyby ortogonality | 39 |
| 6.5 | Měření vlivu I DC offsetu | 42 |
| 6.6 | Měření vlivu nerovnováhy zisku | 44 |
| 6.7 | Měření vlivu Q DC offsetu..... | 46 |
| 7 | Závěr..... | 49 |
| | Použitá literatura | 50 |
| | Seznam příloh..... | LV |

1 Úvod

V dnešní době se pro přenos informací v telekomunikačních sítích využívá hlavně digitální signál. Tyto informace se však nepřenášejí v podobě binárního kódu, ale bitový tok se digitálně moduluje. Tento proces slouží pro zvýšení efektivity přenosového pásma, snížení výkonové náročnosti a úsporu nákladů. Jelikož žádné přenosové medium není dokonalé a v přenášeném signálu se vyskytují chyby, je proto nutné neustálé měření a vyhodnocování signálu tak, aby tyto chyby bylo možné co nejlépe odstranit. Digitálně modulovaný signál je dnes neodmyslitelnou součástí všech datových přenosů. Neustále probíhá další vývoj a zdokonalování digitální modulací tak, aby lidé ještě více zúročili výhody tohoto systému a co nejvíce potlačili jeho nevýhody.

Druhá kapitola s názvem *„Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů“* popisuje teoretický rozbor podoby digitálních modulací, vývoj přenosového media, filtrace signálu, popis RM OSI a zejména fyzické vrstvy. Dále je zde popsáno využití digitálních modulací v moderní telekomunikačních sítích a jsou zde rozebrány degradační vlivy ovlivňující digitálně modulovaný signál.

Třetí kapitola s názvem *„Přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast“* pojednává o vlastnostech přístrojů a nástrojů pro analýzu digitálně modulovaného signálu. V této kapitole nalezneme rozdělení těchto přístrojů, srovnání klasické a virtuální instrumentace a jejich využití v praxi.

V následující kapitole s názvem *„Blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit“* rozebírám a popisuji blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného systému. Toto blokové schéma bylo implementováno do grafického vývojového prostředí LabVIEW. Tato kapitola obsahuje stručný popis grafického programování.

V páté kapitole s názvem *„Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému“* popisuji návrh a tvorbu aplikace grafickém vývojovém prostředí LabVIEW pro reálný hardware od firmy National Instruments, která slouží pro analýzu digitálně modulovaného signálu. Podrobně jsem popsal jednotlivé části této aplikace.

V poslední kapitole nazývajícím se *„Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu“* jsem navrhl a následně realizoval sérii měření tak, abych zjistil vliv jednotlivých chyb signálu na hodnoty MER a EVM. K tomuto měření jsem použil PXI modulární systém od firmy National Instruments a aplikaci, kterou jsem sám vytvořil.

2 Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

2.1 Vývoj signálu

Telegraf zahájil éru moderních komunikací, avšak tento signál měl digitální charakter. Prvním masově využívaným signálem pro komunikaci byl signál analogový. Analogový signál je signál spojitý, který vyjadřováním velikosti amplitudy může reprezentovat určité fyzikální jevy, které mohou být např. světlo, zvuk, tlak a teplo. Pro představu zvukový signál je reprezentovaný spojitými změnami napětí, které se mění v závislosti na tlaku zvukových vln. Analogový signál je předchůdce signálu digitálního. Analogový signál teoreticky nabývá nekonečné mnoha hodnot, protože je spojitý a proto pro přenos takového signálu je zapotřebí nekonečná šířka pásma. V praxi je analogový signál degradován různými šumy a zkresleními, což je zapříčiněno reálnými přenosovými cestami a reálnými přístroji souvisejícími s tímto přenosem. Tyto vlivy způsobují, že analogový signál nikdy nemůže být přenesen naprosto věrně. Tento přenos je vždy zatížen určitou mírou nepřesnosti a záleží na konkrétní situaci, zda-li je tato nepřesnost (zkreslení) nepodstatná, podstatná nebo taková, že daný analogový signál již nelze zrekonstruovat s požadovanou přesností do podoby, jako byl signál původní. Další nepřesnosti mohou vznikat při průchodu analogového signálu jednotlivými prvky přenosového řetězce. Tyto nepřesnosti se kumulují. Tomuto zkreslení se lidem díky své vynalézavosti podařilo do určité míry zamezit, avšak je to velmi technologicky náročné a nákladné. Nikdy však přenos analogového signálu nebude ideální.

A proto lidé začali používat signál digitální, který přináší řadu výhod. Digitální signál je signál nespojitý. Nabývá pouze dvou úrovní interpretovaných do hodnot: logické „0“ a logické „1“.

Hlavní výhody digitálního přenosu jsou:

- přenos informace u digitálního přenosu může být ideální,
- umožňuje dosahovat větších přenosových rychlostí,
- vyšší bezpečnost,
- energetická efektivita,
- přenos různých zpráv sdílenými médii současně,
- snadnější zpracování dat.

Digitální signál je také zatěžován reálnými podmínkami přenosu. U digitálního signálu však můžeme mnohem účinněji eliminovat chyby vzniklé při přenosu v reálném prostředí. [1]

2.2 Vývoj přenosových medií

První používaná přenosová media byly metalické kabely. Využití kovových, zejména měděných vodičů pro přenos informací v datových sítích se na první pohled zdá logickým vyústěním historického vývoje. Od prvního telegrafu, který však byl optický, až po moderní telekomunikační infrastrukturu. Měděné vodiče se lidé naučili snadno a levně vyrábět, používat a instalovat pro různé aplikace. Díky těmto vlastnostem se metalické vedení stalo v minulosti dominantním přenosovým

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

mediem. Metalické vedení je schopno přenášet data rychlostí až 10 Gb/s ale pouze na vzdálenost několika málo metrů. Avšak dnes je již metalické vedení na ústupu, protože jako každá technologie dosáhla svého maxima, které je limitováno technickými, technologickými nebo fyzikálními hranicemi. Další vývoj této technologie postrádal smysl, a proto se další vývoj přenosových medií vydal odlišnými směry a to směrem k optickým kabelům a bezdrátovým přenosům.

Optické kabely používají pro přenos informace světelný impuls (elektromagnetické vlnění). Pro přenos světelného impulsu se využívá principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s odlišnými indexy lomu. Základní konstrukce optického kabelu se skládá ze dvou částí: jádra a pláště. Oproti metalickému vedení přináší optické kabely nesporné výhody: mnohem vyšší přenosové rychlosti až desítky Gb/s na stovky kilometrů, větší šířka pásma, vyšší bezpečnost přenosu, odolnost proti elektromagnetické interferenci. Optické kabely mají i jisté nevýhody jako například: vysoké pořizovací náklady, křehkost optických kabelů. Tyto nevýhody jsou však v porovnání se svými výhodami zanedbatelné, a to v moderní době zapříčinilo masivní rozšíření optických kabelů. Staly se základním stavebním blokem pro veškeré páteřní sítě a nyní se začínají instalovat až k samotnému uživateli.

Největší výhodou bezdrátového přenosu je, že přenos informace je realizován pomocí elektromagnetických vln šířících se ve volném prostoru. A proto není nutno pokládat žádné kabely a uživatel není připoután koncovým zařízením a k infrastruktuře a může se volně pohybovat.

Bezdrátové komunikace dělíme podle délky elektromagnetických vln na:

- optické
- infračervené
- mikrovlnné
- radiové.

Odlišná délka elektromagnetické vlny má jiné vlastnosti a využití.[2]

2.3 Komunikace mezi zařízeními

V dnešní době je stále větší snahou výrobců bořit hranice mezi jednotlivými zařízeními, protože koncový zákazník dnes u přístrojů vyžaduje variabilitu. Dnes už jsou stále menší rozdíly v možnostech a funkcích mezi například mobilním telefonem, tablem a notebookem než tomu bylo před několika lety. Výrobci musí zajistit komunikaci mezi různými druhy zařízení. S rozmachem bezdrátové komunikace se téměř veškerá komunikace mezi těmito zařízeními ubírá tímto směrem. Existuje mnoho standardů pro bezdrátovou komunikaci jako např. : Wi-Fi, ZigBEE, Bluetooth, GPRS a pro komunikaci mezi mobilními telefony GSM, UMTS. Všechny tyto standarty vycházejí z Referenčního modelu (RM) Open Systems Interconnection (OSI).

2.4 RM OSI

Referenční model RM OSI navrhla mezinárodní společnost ISO (International Organization for Standardization) ve snaze standardizovat komunikaci v počítačových sítích. V roce 1984 byl model RM OSI přijat jako mezinárodní norma ISO 7498. Komplexní text normy přijala CCIT jako doporučení X. 200. Model RM OSI se skládá ze sedmi vrstev.

1. **Fyzická vrstva** – zajišťuje fyzický přenos zprávy přes přenosové medium za pomoci jednotlivých bitů. Další úlohy fyzické vrstvy jsou elektrická a fyzická adaptace na přenosové medium jakož i aktivaci a deaktivaci přenosové cesty.
2. **Linková vrstva** – zajišťuje přenos mezi dvěma spojenými uzly. Uspořádává data z fyzické vrstvy do logických celků známých jako rámce. Zajišťuje vysílání, příjem a kontrolu přenášených rámců. V případě nalezení chyby vyžádá opětovné zaslání rámce.
3. **Síťová vrstva** – zajišťuje nalezení adresy k cíli pokud dané systémy mezi sebou přímo nesousedí. Síťová vrstva poskytuje směrovací funkce a určuje cestu, přes kterou bude přenos proveden. Musí být známa topologie sítě.
4. **Transportní vrstva** – vytváří, řídí a zakončuje spojení jako celek pro přenos dat mezi vzájemně komunikujícími systémy. Vrstva nabízí spojově TCP a nespojově orientované UDP protokoly. Zaleží na požadavku vyšších vrstev.
5. **Relační vrstva** – Tato vrstva zajišťuje koordinaci komunikace. Jejím úkolem je např. zahájení komunikace, dohled nad správným průběhem komunikace a také ukončení komunikace.
6. **Prezentační vrstva** – zajišťuje překlad dat mezi různými systémy, které mohou používat různé kódování dat. Zde také může probíhat komprese a šifrování dat.
7. **Aplikační vrstva** – smyslem aplikační vrstvy je poskytnout přístup aplikacím ke komunikačnímu systému a umožnit tak vzájemnou spolupráci. Zde patří služby např.: POP3,SSH,FTP,DNS, DHCP a jiné. [3]

2.5 Fyzická vrstva RM OSI

Jelikož se tato práce zabývá měřením a analýzou na fyzické vrstvě, tak ji bude věnován detailnější teoretický rozbor. Tato vrstva je technologický závislá (ISDN, ATM, GSM,Ethernet...), ale je protokolově nezávislá. Tato vrstva všeobecně specifikuje přenos bitů od jednoho terminálu k druhému. Fyzická vrstva poskytuje elektrické a mechanické vlastnosti nutné pro přenos informace daným prostředím, plní funkce nutné pro navázání, udržení a zrušení spojení mezi terminály. Další funkce a možnosti fyzické vrstvy:

- Možnost sériové a paralelní komunikace
- Synchronizace
- Možnost simplexovaného spojení, poloviční a plný duplex
- Multiplexování
- Modulace
- Linkové kódování

[3]

2.6 Modulace

Modulace je nelineární proces, který nejprve sloužil pro úpravu signálu v základním pásmu na signál, který je pro přenos vhodnější. K modulačnímu signálu se namoduluje signál nosný, který má obvykle podobu pravidelně se měnícího sinusového signálu. Modulační signál nám ovlivňuje buďto amplitudu, fázi nebo frekvenci nosného signálu. Zaleží na typu použité modulace. Takto upravený

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

signál je následně přenesen. Postupem času začal narůstat počet účastníků telekomunikační sítě a vzrostly požadavky na objem přenášených dat. Protože však dostupná přenosová pásma jsou omezená a nelze je rozšiřovat, hledaly se proto způsoby, jak přenést větší objem dat při stejném přenosovém pásmu. [4]

2.7 Digitální modulace

S příchodem digitálního signálu se začaly používat i digitální modulace. To umožnilo přenést mnohem větší objem dat a uspokojit tak požadavky trhu. Digitální modulace byly hlavně zavedeny s cílem co nejefektivněji využívat přenosové pásmo, zlepšit kvalitu komunikace, zlepšit zabezpečení dat. Systémy využívající digitální modulace jsou zpravidla vyvíjeny s důrazem na:

- Efektivitu využívaného pásma – určuje, jak efektivně dokáže systém přenést objem dat v omezeném frekvenčním pásmu.
- Efektivitu využití výkonu – určuje schopnost přenést objem dat s co nejmenším výkonem
- Efektivitu nákladů – určuje schopnost přenést objem dat s co nejnižšími náklady na jeho vývoj a výrobu.

Limitující faktory při vlastním vývoji systému jsou:

- Dostupná šíře frekvenčního pásma
- Přípustný výkon
- Vlastní šum

[5]

2.8 Vztah mezi modulační a přenosovou rychlostí

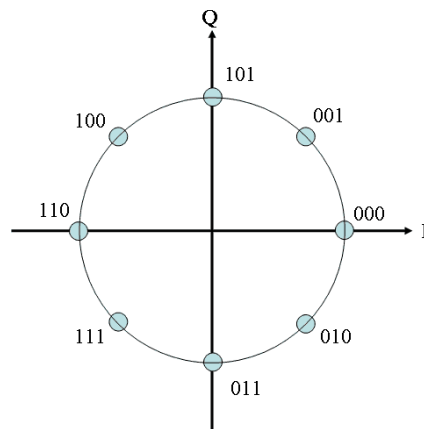
Modulační rychlost udává počet symbolů přenesených za sekundu. Jednotka modulační rychlosti se udává v baudech. Přenosová rychlost udává počet bitů přenesených za sekundu. Jednotka přenosové rychlosti je bit/s. Vztah mezi modulační a přenosovou rychlostí vyplývá ze skutečnosti, že symbol může reprezentovat několik bitů (např. 2,3,4 atd.). Tento vztah lze popsat vzorcem:

$$V_{\text{přenosová}} = V_{\text{modulační}} \cdot \log_2(n)$$

kde n je počet stavů v rámci daného modulačního schématu

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

Například, pokud modulační schéma obsahuje osm stavů, pak přenosová rychlost je třikrát větší než rychlost modulační (viz Obr 2.1).

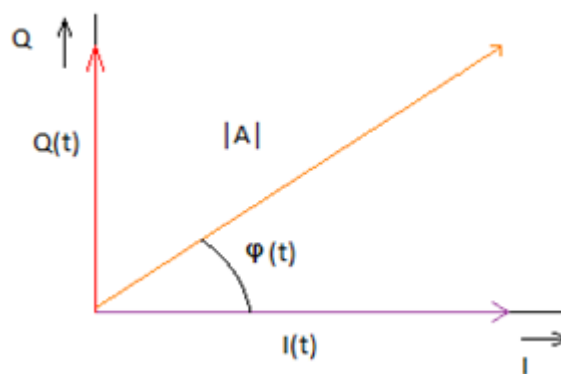


Obrázek 2.1: Modulační schéma 8-PSK

[5]

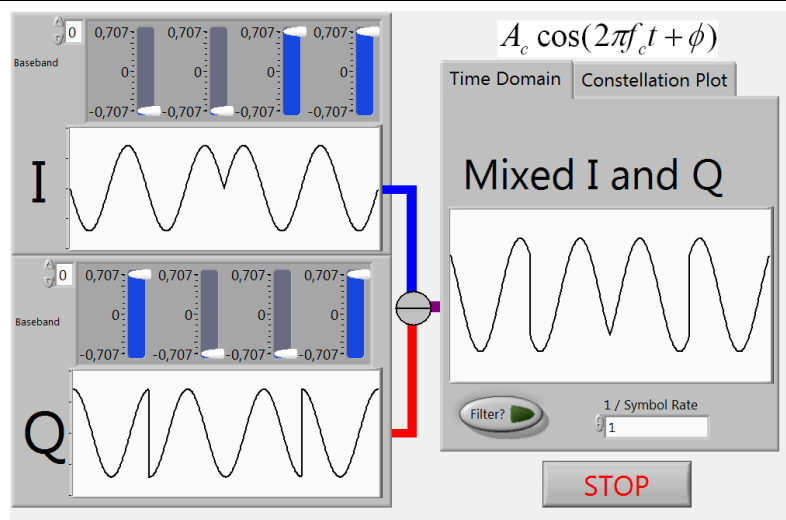
2.9 I/Q modulace

Většinu metod používaných při modulování signálu v digitálních komunikacích, lze realizovat pomocí IQ modulátorů, kde je možno kterýkoli vf signál o úhlové frekvenci ω , o časově proměnné fázi $\varphi(t)$ a časově proměnné amplitudě $A(t)$ zobrazit v komplexní rovině jako fázor složený ze dvou ortogonálních složek $I(t)$ (In-phase) a $Q(t)$ (Quadrature-phase) se stejnými frekvencemi a se vzájemnou fází 90° (viz. Obr. 2.2) Každému amplitudově fázovému stavu dané modulace odpovídá určitá velikost těchto ortogonálních složek složek. [5]



Obrázek 2.2: I/Q diagram

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.



Obrázek 2.3: Reálná podoba I a Q složky a výsledné kompozitní složky

Na obrázku (viz. Obr. 2.3) vidíme průběh okamžitých hodnot složek I a Q v čase a výslednou součtovou podobu modulovaného signálu v čase.

2.9.1 Vektorový diagram

Vznikne průběžným zobrazením koncového bodu výslednice součtu ortogonálních modulačních složek I a Q. Zobrazuje nejen jednotlivé stavy (symboly), ale i přechody mezi nimi. Na vektorovém diagramu je možno vidět cesty, kterými prochází nosná při přechodu mezi jednotlivými stavy, nejsou však zde detailně vidět chyby vyskytující se v jednotlivých stavech (symbolech). [6]

2.9.2 Konstelační diagram

Je velmi podobný vektorovému diagramu, ale není možno na něm vidět cesty, kterými prochází modulovaná nosná mezi jednotlivými stavy. Zobrazuje pouze koncový bod fázoru modulované nosné tak, jak je opakovaně snímán v okamžicích rozhodnutí, kdy je signál vzorkován. Z tohoto diagramu lze vyhodnotit různé druhy degradace signálu. [6]

2.10 Frekvenční filtrace v digitálně modulovaných signálech

Rádiovým kanálem se šíří digitálně modulovaná sinusovka, která obsahuje nespojitosti, takže ji lze chápat jako superpozici sinusovky a obdélníku. Obálka jeho výkonového spektra zabírá nekonečně široké frekvenční pásmo. Přenos všech složek modulovaného signálu je však reálným přenosovým kanálem nemožný a také zbytečný, protože hlavní energetický obsah je soustředěn do hlavního laloku zprávy.

Pro vymezení šíření vysílaného výkonu do šířky rádiového kanálu se v praxi používají filtry.

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

Následující metody návrhu filtru používaných v praxi:

- Filtrace na nulové intersymbolové intervenci (ISI=0), dosahovaná při minimální šířce potřebného pásma. Například RC (Raised Cosine Filters) a SRRC(Square Root Raised Cosine filters, které mohou být použity na straně vysílače i přijímače.
- Předmodulační filtrace ve vysílači pomocí gaussovských dolních propustí, které zajišťují výrazné potlačení bočních laloků radiového spektra.
- Filtrace za pomoci přizpůsobeného filtru na vstupu přijímače, které maximalizují poměr signál/šum. Tato metoda je velmi vhodná zejména u systému s velmi slabými přijímanými signály.
- Filtrace na vstupu přijímače typu I&D(Integrate and Dump, tj. Integrace a resetování k nule). Tyto filtry mají podobné vlastnosti jako filtry přizpůsobené.

[3]

Chování filtru Raised-cosine ve frekvenční oblasti lze vyjádřit vzorcem:

$$H(f) = \begin{cases} T, & \text{pro } |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{T}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi T}{\beta} \left| f| - \frac{1-\beta}{2T} \right| \right), & \text{pro } \frac{1-\beta}{2T} < |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \text{jinde} \end{cases}$$

$$0 \leq \beta \leq 1$$

kde: T je modulační rychlost

β je Roll-off faktor

f je frekvence signálu

Impulzní odezva takového filtru je popsána vzorcem:

$$h(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi\beta t}{T}\right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}}$$

kde: T je modulační rychlost

β je Roll-off faktor

t čas

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

Roll-off faktor, značený β , je naměřená hodnota nadměrné šířky pásma filtru, tj. šířka pásma, která se vyskytuje mimo Nyquistovu šířku pásma $\frac{1}{2T}$, pokud označíme přebytečnou šířku pásma jako Δf poté platí:

$$\beta = \frac{\Delta f}{\left(\frac{1}{2T}\right)} = \frac{\Delta f}{\frac{R_s}{2}} = 2T\Delta f$$

Kde: T je modulační rychlost

$T_s = \frac{1}{T}$, vyjadřuje symbolovou rychlost

f je frekvence signálu

Impulzní odezva Root Raised-cosine filtru lze vyjádřit:

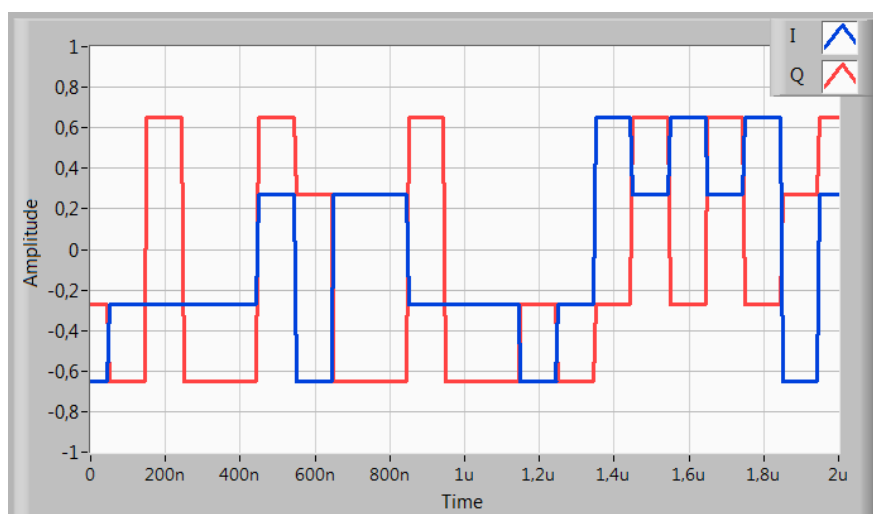
$$h(t) = \begin{cases} 1 - \beta + 4\frac{\beta}{\pi}, & \text{pro } t = 0 \\ \frac{\beta}{\sqrt{2}} \left[\left(1 + \frac{2}{\pi}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4\beta}\right) + \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4\beta}\right) \right], & \text{pro } t = \pm \frac{T_s}{4\beta} \\ \frac{\sin\left[\pi \frac{t}{T_s} (1 - \beta)\right] + 4\beta \frac{t}{T_s} \cos\left[\pi \frac{t}{T_s} (1 + \beta)\right]}{\pi \frac{t}{T_s} \left[1 - \left(4\beta \frac{t}{T_s}\right)^2\right]}, & \text{jinde} \end{cases}$$

kde: T_s je převrácená hodnota modulační rychlost

t je čas

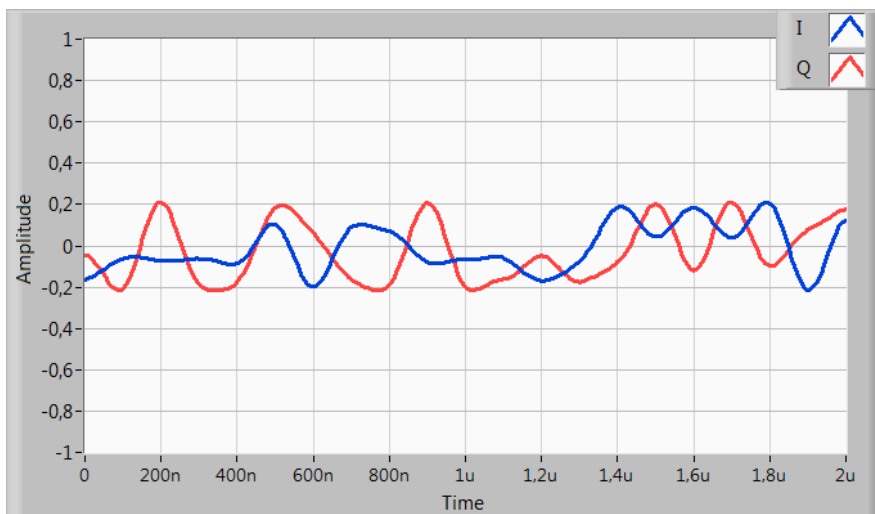
β je Roll-off faktor

Na obrázcích (viz. Obr. 2.4 a Obr.2.5) vidíme vliv filtru na I a Q složku signálu v modulaci 8-PSK. Takto upravený signál lze přenést s minimální potřebnou šířkou pásma.



Obrázek 2.4: I a Q složka v modulaci 8-PSK bez použití filtru

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

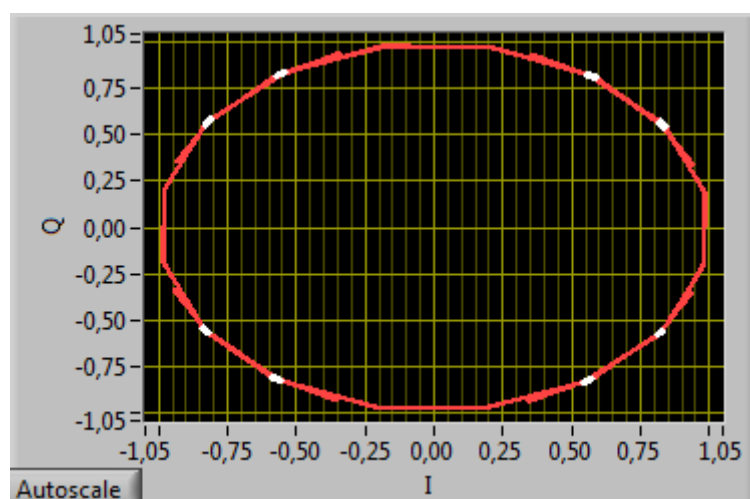


Obrázek 2.5: I a Q složka v modulaci 8-PSK s použitím Root Raised Cosine filtru

2.11 Digitální modulace používané v moderních telekomunikačních sítích

2.11.1 GSM

Modulace používaná v mobilních sítích druhé generace (GSM) se nazývá GMSK. Tato modulace je odvozena od MSK (Minimum Shift Keying). MSK vychází zase z modelu modulace CPFSK. U základní modulace FSK se však vyskytuje skoková změna fáze, která vyžaduje relativně velké spektrum pro přenos. Proto se vyvinuly modulace s plynulou změnou fáze CMP (Continuous Phase Modulation) a tedy CPFSK. Tyto modulace vykazují vyšší výkonovou spektrální účinnost. Signál namodulovaný metodou MSK zaujímá relativně malé přenosové pásmo, ale bohužel vyzařuje parazitní signál do sousedních pásem. Toto však lze odstranit vhodnou předfiltrací signálu za pomoci Gaussovské dolní propusti a proto název modulace GMSK. Na obrázku (viz Obr 2.6) vidíme příklad GMSK modulace.[7]



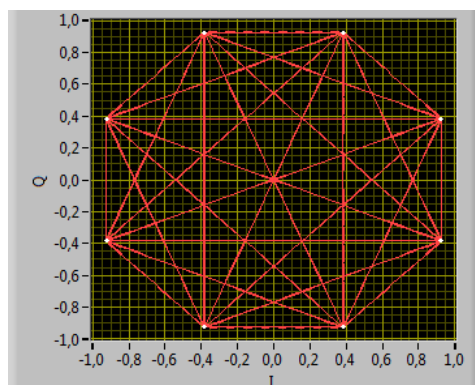
Obrázek 2.6: Vektorový diagram GMSK

2.11.2 EDGE

Zde se využívá modulace GMSK stejně jako u mobilní sítě GSM a také modulace 8-PSK. Princip GMSK je již uveden výše. 8-PSK vyjadřuje osmistavovou modulaci PSK. Jednotlivé stavy

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

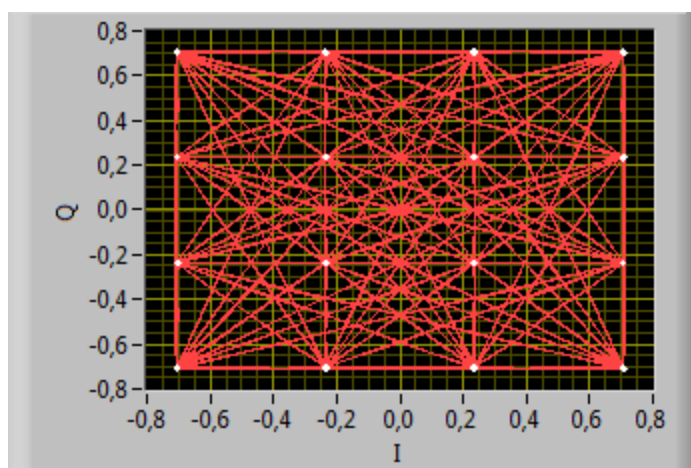
jsou od sebe odděleny fázovým posuvem. Jeden stav reprezentuje 3 bity, to znamená, že přenosová rychlost je 3x vyšší než rychlost modulační. Na obrázku (viz Obr. 2.7). [7]



Obrázek 2.7: Vektorový diagram 8-PSK

2.11.3 UMTS

V mobilních sítích třetí generace (UMTS) se používají modulační QPSK (Quadrature PSK) a s pátým rozšířením UMTS sítě byla přidána technologie **HSDPA** (High Speed Downlink Packet Access) využívající QAM. Tato modulační využívá dvou obvykle sinusových signálů vzájemně fázově posunutých o 90° , známých jako kvadraturní nosné. Obě nosné jsou nezávislé na sobě klíčovány a poté sečteny. Výsledný klíčovaný signál je ovlivněn jak fázovým posuvem (PSK), tak amplitudovým posuvem (ASK). Za pomoci ovlivnění fáze a amplitudy lze v konstelačním diagramu rozlišit různý počet stavů a tak přenášet více bitů současně. Pro slabý signál se používá modulační 8-PSK, která byla zmíněna v technologii EDGE. Na obrázku (viz Obr. 2.8) vidíme příklad 16-QAM modulační. [7]



Obrázek 2.8: Vektorový diagram 16-QAM

2.11.4 Degradací vlivy signálu

Předchozí text popisoval tvar signálu v rádiovém kanálu v jeho ideální podobě. Reálné systémy pracují se signálem, který je díky přenosu rádiovým kanálem různě degradován. [8]

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

2.11.5 Vícecestné šíření

Díky interakcím elektromagnetické vlny s atmosférou a zemským povrchem a s překážkami je způsobeno u radiových komunikací, tzv. vícecestné šíření. Od vysílače k přijímači se kromě přímé vlny šíří i odrazem vlna druhotná, která se s vlnou přímou sčítá. Při šíření v zastavěné oblasti může být odražených vln nekonečně mnoho. [8]

2.11.6 Únik

Únikem nazýváme jev, kdy dochází k náhodnému kolísání útlumu způsobeného šířením. Jediným způsobem jak spolehlivě vyhodnotit náhodné úniky je statistika založená na dlouhodobých měřeních jednotlivých jevů. Tyto úniky dělíme dle charakteru na jednotlivé úniky:

Úniky používané pro hodnocení pevných spojů a to při nezastíněném šíření v atmosféře.

- Ploché úniky – tyto úniky mají konstantní útlum na celém frekvenčním pásmu daného přenosu. Jejich změny jsou ve velké většině pomalé a nemá na ně vliv změna polohy antén.
- Frekvenčně selektivní úniky – jsou charakterizovány proměnlivým útlumem vůči frekvenčnímu pásmu daného přenosového kanálu. Příčinou těchto úniků je vícecestné šíření.

Pro mobilní spoje v zástavbě hovoříme o tzv. pomalých a rychlých únicích.

- Pomalé úniky – vznikají zastíněním spoje zástavbou a z pohledu frekvenčního pásma mají charakteristiku plochého úniku.
- Rychlé úniky – mají frekvenčně selektivní charakter, jelikož jsou způsobeny vícecestným šířením. Tyto úniky je možné odfiltrovat průměrováním přes vhodný časový interval, resp. přes dráhu pohybu přijímací antény v případě mobilního spoje

[8]

2.11.7 Chyba Amplitudy

Parametr chyba amplitudy vyjadřuje rozdíl velikosti amplitudy ideálního signálu a velikosti amplitudy přijímaného I/Q signálu. Toto je vztaženo k pozici jednotlivých symbolů v konstelačním diagramu. Hodnoty mohou být naměřeny pozitivní nebo negativní, kde pozitivní hodnota indikuje zesílení amplitudy signálu a negativní indikuje útlum amplitudy signálu. Jednotkou měření je dB. V praxi měřicí přístroje používají procentuální vyhodnocení signálu vzhledem k signálu ideálnímu.

2.11.8 Rozdíl amplitud I a Q složky signálu

Rozdíl velikosti amplitud mezi jednotlivými I a Q složkami způsobuje posun symbolů v konstelačním diagramu od jejich ideální pozice. Posuv ve vertikální rovině je způsoben menší velikostí amplitudy složky Q než I. Posuv v horizontální rovině je způsoben menší velikostí amplitudy složky I než Q. Nerovnováha zisku způsobuje problémy v systémech pracujících s přímou upkonverzí RF.

2.11.9 Chyba fáze – jitter a wander

Krátkodobé změny polohy signálových prvků u digitálního signálu se projevují jako chvění fáze. Rozlišujeme dva druhy chvění fáze dle frekvence:

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

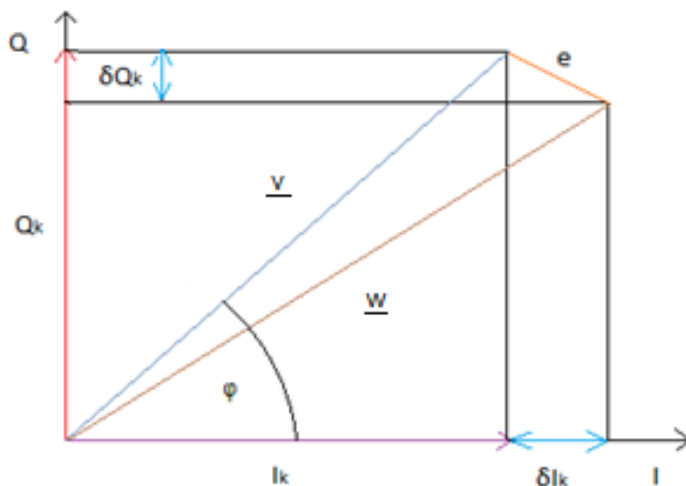
- Pro frekvence menší než 10Hz hovoříme o wander.
- Pro frekvence rovny 10Hz nebo vyšší hovoříme o jitteru.

Fázové chvění se nejčastěji vyjadřuje v násobcích jednotkového intervalu T_0 neboli UI (unit interval), v hodnotě časového posunu, nebo v uhlové míře časového posuvu.

2.12 Způsoby vyhodnocení degradačních vlivů signálu

2.12.1 MER (Modulation Error Ratio)

MER je měření poměru signálu/šumu v digitálně modulovaných signálech. Vyjadřuje poměr součtu čtverců amplitud přijatého signálu k velikosti součtu amplitud ideálního signálu. MER se obvykle vyjadřuje jednotkou dB. Na obrázku (viz Obr. 2.9) vidíme, že „e“ vyjadřuje velikost chybového vektoru, „v“ je ideální symbolový vektor, „w“ je přijatý symbolový vektor, „ δI_k “ znázorňuje rozdíl velikosti amplitud mezi amplitudou ideální a přijatou složky I, „ δQ_k “ znázorňuje rozdíl velikosti amplitud mezi amplitudou ideální a přijatou složky Q „ ϕ “ určuje velikost fáze ideálního symbolu.



Obrázek 2.9: Zobrazení modulační chyby

$$MER = \frac{\sum_{j=1}^N (I_k + Q_k)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_k + \delta Q_k)}$$

kde

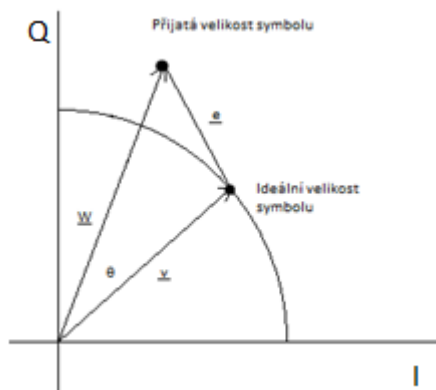
- I_k je ideální velikost složky I
- Q_k je ideální velikost složky Q
- δI_k je rozdíl mezi velikostí přichodí složky I od ideální velikosti složky I
- δQ_k je rozdíl mezi velikostí přichodí složky Q od ideální velikosti složky Q

[9]

Teoretický rozbor podoby digitálně modulovaných signálů na úrovni fyzické vrstvy v jejich ideální i reálné podobě. Veličiny charakterizující parametry digitálně modulovaných signálů.

2.12.2 EVM (Error Vector Magnitude)

Princip měření je založen na porovnávání aktuálních naměřených hodnot amplitudy a fáze signálu s referenčními hodnotami, které jsou průběžně počítány na základě znalosti parametrů a vlastností daného modulačního systému (modulačního formátu, toku vysílaných dat, filtrace v základním pásmu, atd.) Rozdíl mezi oběma fázory je základem pro měření EVM (Error Vector Magnitude). Dává dobrý přehled o šumu a zkreslení, a může pomoci při identifikaci zdrojů degradace signálu. Na obrázku (viz Obr. 2.10) vidíme, že „e“ vyjadřuje velikost chybového vektoru, „v“ je ideální symbolový vektor, „w“ je přijatý symbolový vektor. [9]



Obrázek 2.10: Grafické vyjádření chybového vektoru e

$$EVM = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\delta I_k)^2 + (\delta Q_k)^2}}{|v_{\max}|},$$

kde

- δI_k je rozdíl mezi velikostí příchozí složky I od ideální velikosti složky I
- δQ_k je rozdíl mezi velikostí příchozí složky Q od ideální velikosti složky Q
- EVM je normalizováno podle $|v_{\max}|$, jež je vyjádřeno v procentech.

3 **Přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.**

Společně s rozvojem telekomunikační sítě vznikla potřeba měření signálů tak, aby se podařilo odhalit zdroje rušení a chyb, a vylepšit tak celkový přenos. Vývoj přístrojů pro analýzu signálu se rozvíjel od analogových měřicích přístrojů přes digitální přístroje s komunikačním rozhraním až po virtuální instrumentaci.

3.1 **Vývoj klasické instrumentace**

3.1.1 **Spektrální měření**

Spektrální a signálové analyzátory tvoří dominantní skupinu přístrojů, které slouží pro měření v digitálních a analogových systémech. Spektrální měření slouží zejména pro vyhodnocování signálu ve frekvenční oblasti. **Spektrální analyzátory** měří skalární veličiny jako frekvenci, amplitudu, velikost amplitudy, obsazenost frekvenčního pásma, šumové parametry a modulační parametry jednotlivých analogových modulací. Vektorové analyzátory umožňují navíc měřit modulační parametry ortogonálních modulací, zobrazovat vektorové a konstelační diagramy. Spektrální a signálové analyzátory dělíme na dvě skupiny:

- Spektrální analyzátory využívající filtrace signálu (analogové nebo digitální)
- Spektrální analyzátory využívající výpočtu diskrétní Fourierovou transformací (DFT)

[11]

3.1.2 **Měření vysokofrekvenčního výkonu**

Výkon je často měřenou veličinou v bezdrátových technologiích, protože přímo ovlivňuje rozsah pokrytí daného prostoru vř signálem. Metody měření výkonu jsou založeny na různých principech. Rozdílné principy jsou vhodné pro různé technologie. Základní výkonové veličiny měřené v telekomunikacích:

- Okamžitý výkon
- Střední výkon $p(t)$
- Obálkový výkon signálu $P_e(t)$
- Špičkový obálkový výkon PEP (Peak envelope Power)
- Špičková hodnota P_p
- Výkonové spektrum
- Výkonová spektrální hustota PSD (Power Spectral Density)

Rozdělení principu měření dělíme wattmetry do čtyř základních skupin:

- Diodové detektory – tyto detektory využívají VA charakteristiky
- Kalorimetrické metody – statické kalorimetry, adiabatické kalorimetry, průtokové kalorimetry

Přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

- Bolometrické metody – wattmetry s odporovým čidlem, wattmetry s tenko vrstevným odporovým čidlem,
- wattmetry s termistorovým čidlem

Toto měření výkonu je ovlivňováno celou řadou faktorů. Nedokonalá konverze VF výkonu v čidle wattmetru je vyjádřena jako kalibrační činitel a efektivní účinnost. Další chyby měření způsobuje nedokonalé přizpůsobení wattmetru v měřicím systému, při substituci v děličích výkonu a ve směrových vazebních členech. [11]

3.1.3 Osciloskop

Osciloskop je přístroj, sloužící pro:

- sledování napěťových průběhů signálů v závislosti na čase (periody, frekvence, doby náběhu a poklesu, doby překmitů, šířky pulzu).
- měření fázového rozdílu dvou průběhů napětí (Lissajousovy obrazce)
- měření dynamické hysterezní křivky feromagnetických materiálů
- měření V-A charakteristik elektronických prvků

S vhodným převodníkem lze měřit jakýkoliv jev- zvuk, tlak, světlo a jiné. V zobrazeném grafu obvykle svislá osa (y) představuje napětí a vodorovná osa (x) představuje čas. Všechny osciloskopy obsahují tyto základní obvody:

Vstupní obvody – slouží pro úpravu vstupního signálu. Na vstupu je umístěn napěťový kompenzovaný dělič. Obsahuje také spínačem přemostitelnou kapacitu, která v době, kdy není přemostěna, slouží k odstranění stejnosměrné složky signálu.

Vertikální zesilovač - slouží pro zesílení signálu, který je na něj přiveden ze vstupních obvodů, na úroveň, která je vhodná pro vychylování elektronového svazku.

Horizontální zesilovač – plní obdobnou funkci jako vertikální zesilovač, ale zesiluje signál z generátoru časové základny.

Generátor časové základny - vytváří pilovité napětí, pro horizontální vychylování (ve směru osy X).

Obrazovka - zobrazovací zařízení sloužící pro zobrazení měřených hodnot.

Přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

Osciloskopy můžeme rozdělit do dvou základních skupin: analogové a digitální (s číslicovou pamětí).

| Výhody analogových osciloskopů: | Nevýhody analogových osciloskopů: |
|--|--|
| Reagují bezprostředně na změny | Nezachytí jednorázové děje |
| | Obtížně zobrazují pomalé děje |
| | Neumožňují zkoumat signál před příchodem spouštěcího impulsu |
| | Není možný záznam signálu: |

| Výhody digitálních osciloskopů: | Nevýhody digitálních osciloskopů: |
|---|---|
| Umožňují mnohakanálový záznam | Chyba aliasing při nesplnění vzorkovacího teorému |
| Umožňují záznam signálu a jeho další zpracování | Menší rychlost obnovování průběhu na displeji |
| Možnost sledování signálu před příchodem spouštěcí podmínky | |
| Přenos dat | |

Měření s maskou:

Toto měření se obvykle používá po ověření správné funkce sériových komunikačních kanálů. U tohoto měření se zobrazí diagram oka, kde je osciloskop spouštěn hodinovým signálem. Tento signál definuje okamžiky platnosti sériových dat. Hodinový signál může být externí nebo si jej osciloskop rekonstruuje z přijímaného datového toku. Masky obvykle definuje oblast, do které signál nesmí vstoupit. [12]

Diagram oka

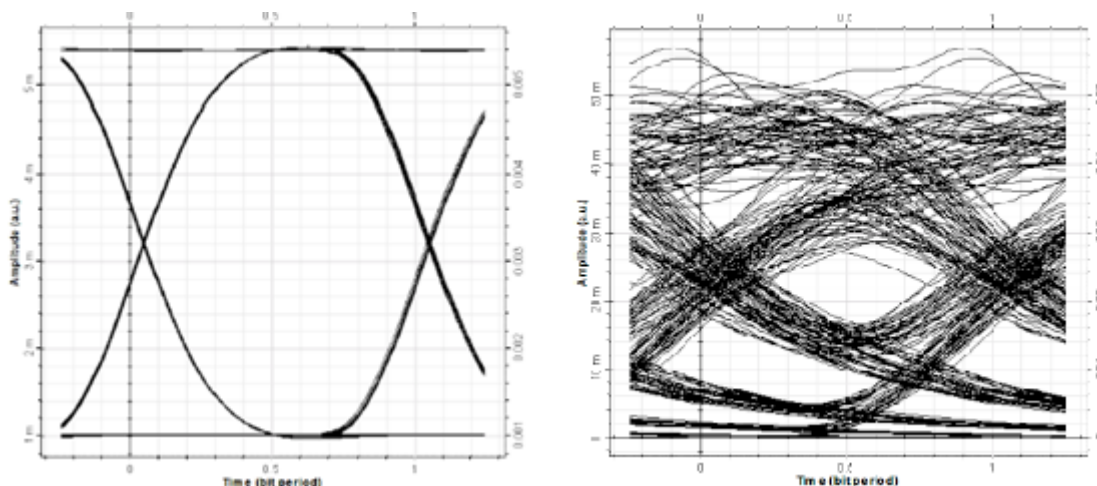
Z diagramu oka je na osciloskopu možné kvalitativně vyhodnotit některé rušivé vlivy, jako je mezisymbolová interference, jitter, proměnná rychlost šíření signálu kanálem, fluktuální šum superponovaný na signál apod.

Na osciloskopech můžeme vyhodnotit signál za pomoci diagramu Oka. Základní parametry, které se u diagramu určují, jsou otevření a šířka oka. Otevřenost oka charakterizuje vzdálenost mezi log „1“ a log „0“. Čím je otevřenost oka větší, tím je pravděpodobnost vzájemné záměny mezi stavy nižší. Šířka oka určuje toleranci výběru míst, kde se provádí vzorkování aktuální binární hodnoty

Přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

(střed oka). K chybě dochází, pokud je oko prakticky zavřené, nebo je-li okamžik vzorkování posunut kvůli působení fázového neklidu. Z diagramu oka vyhodnocujeme rušivé vlivy, jakou jsou proměnná rychlost šíření kanálem, flukтуаční šum superponovaný na signál nebo jitter. Na obrázku (viz Obr. 3.1) vidíme dva diagramy oka. První diagram vykazuje nulové rušení a druhý diagram je ovlivněn rušivými vlivy přenosu.

[11]



Obrázek 3.1: Diagramy oka pro hodnoty BER 0 a 0,0224

3.2 Virtuální instrumentace

Hlavní myšlenkou virtuální instrumentace je doplnění personálního počítače o prvky, které by sloužily tak, aby personální počítač mohl plnit funkci víceúčelového měřicího přístroje tak, aby při změně měřících karet mohl personální počítač provádět jiná specifická měření což by zajistilo jeho variabilitu. Aby počítač mohl plnit tuto úlohu, je nutno jeho hardware doplnit o zásuvné multifunkční karty (zásuvné měřící desky).

V současné době ve velké míře přibývá testovacích systémů založených na platformě PXI. Zkratka PXI je odvozena of PCI Extensions for Instrumentation. Modulární platforma PXI je založena na bázi osobního počítače. Skloubením PC sběrnice PCI s odolným mechanickým provedením Eurocard.

Tento systém se skládá ze tří základních částí – skříně, systémového kontroléru a periferních modulů.

Skříň

Skříň tvoří kostru celého systému. Tato skříň obsahuje vysoce výkonný propojovací systém PXI, obsahující sběrnici PCI, časovací a spouštěcí sběrnice. Za pomoci těchto sběrnic můžete vyvíjet systémy pro aplikace vyžadující přesnou synchronizaci.

Systémový kontrolér

Systémový kontrolér se vyrábí v několika variantách. Nejčastěji se jedná o embedded kontrolér PXI, který představuje kompletní systém ve skříní PXI a není pro jeho ovládání zapotřebí PC. Dalším druhem kontroléru je MXI, který umožňuje řídit systémy PXI přímo z vašeho počítače prostřednictvím softwarově transparentního spojení.

Zásuvné moduly

Zásuvné moduly slouží pro provádění specifických funkcí. Celý systém PXI bude provádět dané měření dle typů použitých modulů. V dnešní době existuje široká škála modulů pro nejrůznější aplikace jako jsou měření napětí, proudu, frekvence a mnoho dalších. Zmíníme si tu moduly downconverter (PXI-5600) a rychlostní digitizér (PXI-5142). Jelikož v této diplomové práci budou využity pro realizaci analyzátoru digitálně modulovaných signálů. Downconverter pracuje v rozmezí 250 kHz až 2,7 GHz. Downconverter zpracovává signál na IF (15 MHz). To umožňuje získat maximální šířku pásma 20 MHz. Rychlý digitizér pracuje s maximální vzorkovací frekvencí 64 MS/s. Digitizér obsahuje digitální downconverter čip (DDC), který umožňuje provádět digitální downconversion IF šířka pásma je 1,25 MHz. Pokud je vyžadována větší šířka pásma, pak lze downconversion realizovat softwarově, ale tento proces je značně pomalejší.

Možnosti měření jsou určeny nejen hardwarovou částí PXI systému, ale zejména softwarovou částí. Pro ovládání toho systému slouží vývojové prostředí LabVIEW, které je možno rozšířit o dodatečné knihovny. S vývojovým prostředím LabVIEW a rozšiřující knihovnou Modulation Toolkit představují tyto moduly (PXI-5600), (PXI-5142) velice variabilní platformu pro měření parametrů jako jsou:

- výkon v pásmu (in-band power),
- výkon mimo pásmo (adjacentchannel power), hledání
- maximální hodnoty výkonu (power and frequency-Peak-search).
- Grafické zobrazení výsledků měření např. jako jsou 3D spektrogramy, konstelační a vektorové diagramy pro analýzu digitálně modulovaných signálů

[6]

PXI rozhraní (PCI Extensions for Instrumentation) vzniklo v roce 1997 a představuje otevřenou specifikaci komunikační sběrnice, která definuje použitelnou platformu v provozních podmínkách. Sdružení PXI je nyní tvořeno více jak 70 členskými firmami.

Zákazníci mají možnost výběru ze široké škály modulů sloužících pro měření, generování signálu, VF techniku a další.

Nejnovější moduly pro sběrnici PXI Express dosahují trvalé přenosové rychlosti až 600 Mb/s. Nové šestnáctibitové generátory libovolných průběhu NI PXIe-5442 mohou generovat průběhy v délce až několika terabajtů a přenášet data z disku plnou rychlosti až 200 Mb/s. Tímto se zkracuje doba potřebná pro provedení měření. PXI Express je rozšířená verze specifikace PXI.[14]

Softwarovou část zajišťuje vhodný program, který plní veškeré funkce měřicího přístroje a slouží jako firmware měřicího přístroje, čím se zabrání duplicitě mezi počítačem a měřicím přístrojem. Klíčovou součástí měřicího programu je Grafické uživatelské rozhraní. Toto rozhraní slouží jako

Přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaných signálů. Srovnání klasické a virtuální instrumentace pro tuto aplikační oblast.

klasický čelní panel měřicího přístroje, obsahuje ovládací prvky sloužící pro ovládání a nastavování parametru a indikační prvky sloužící pro informování uživatele o výsledcích měření.

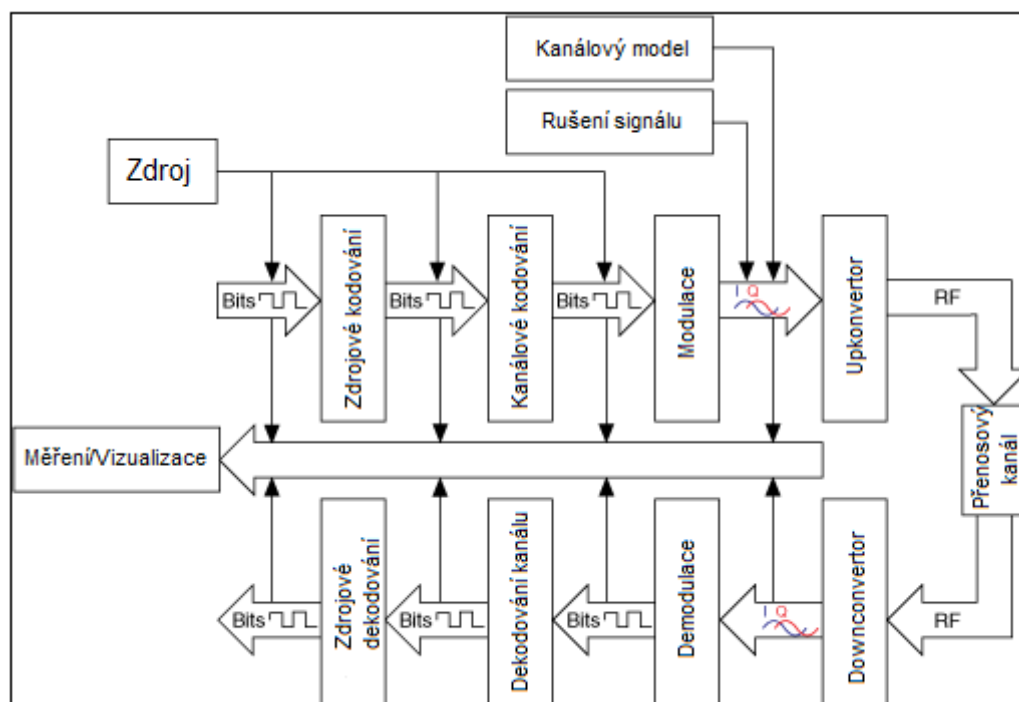
Srovnání klasické a virtuální instrumentace

| Klasická instrumentace | Virtuální instrumentace |
|---|---|
| Funkce a možnosti přístroje definuje výrobce. | Funkce a možnosti přístroje definuje uživatel. |
| Specificky zaměřený přístroj, omezené možnosti komunikace | Flexibilní systém s jednoduchou možností různých druhů komunikace |
| Klíčovou částí je zde Hardware | Klíčovou částí je zde Software |
| Obecně vyšší náklady | Obecně nižší náklady |
| Uzavřená architektura, minimální modifikovatelnost | Otevřená architektura, velké možnosti modifikace |

[13]

4 Blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.

Abychom mohli přenést digitálně modulovaný signál od vysílače k přijímači, musí tento signál projít určitými fázemi přenosového procesu. Tento přenosový proces se často interpretuje za pomoci blokového diagramu (viz Obr. 4.1), kde vidíme základní stavební bloky přenosového procesu. Blokový diagram přenosového procesu se skládá z vysílací části, přenosové cesty a přijímací části.



Obrázek 4.1: Blokové schéma přenosového systému

[15]

Zdroj – jímž může být například mikrofon. Ten přeměňuje přenášenou veličinu, jež je v obecném tvaru většinou neelektrické veličiny na signál elektrický.

Zdrojové kódování – obsahuje A/D převodník, který zdrojový signál digitalizuje (pokud nebyl v digitální podobě) a poté se signál podrobí vlastnímu zdrojovému kódování za účelem redukce bitové rychlosti. Slouží také k částečnému potlačení redundance a irelevance.

Kanálové kódování – zde se přidává určitá redundantní složka. Tato složka je přesně kontrolována a slouží k potlačení nebo odhalení chyb způsobené samotným přenosem. Proto se kodér a dekodér kanálu označuje jako detekce a korekce chyb.

Modulace – zde se signál moduluje za pomoci určitého modulačního schématu na nosnou vlnu, nacházejících se ve vysokofrekvenčních nebo mikrovlnných pásmech.

Blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.

Upkonvertor – konvertuje nižší frekvence na frekvence vyšší. V některých blokových schématech je součástí modulátoru.

Downconverter - konvertuje vyšší frekvence na frekvence nižší. V některých blokových schématech je součástí demodulátoru.

Demodulace – Převádí přijímaný vysokofrekvenční nebo mikrovlny signál na modulovaný signál. Ten by se měl co nejvíce shodovat se signálem na výstupu modulátoru.

Dekódování kanálu – na základě znalosti algoritmu kanálového kódování a s využitím ochranné redundantní informace obsažené v přijímaném signálu, provádí rekonstrukci originální informační sekvence.

Zdrojové dekodování – realizuje inverzní operace již zmíněného kodéru zdroje. Redundantní informace, potlačena kodéru zdroje vysílače, má charakter predikovatelné veličiny a musí být ve zdrojovém dekodéru přijímače opět pokud možno bezesbýtku doplněna. Naproti tomu irelevance, jednou odstraněná ze signálu na vysílací straně, je nenávratně ztracena a nelze ji žádným způsobem obnovit. To však není na závadu, protože u navrhovaného systému koncový příjemce přenášeného signálu tuto ztrátu ani nepostřehne. Takto upravený signál je možné v případě potřeby za pomoci D/A převodníku převést do analogové podoby.

Koncový stupeň – zde se analogový signál může převést do své původní neelektrické formy např. do zvuku za použití reproduktoru.

[16]

4.1 Realizace přijímací částí přenosového řetězce pomocí virtuální instrumentace.

Přijímací část přenosového řetězce sestojíme pomocí virtuální instrumentace od společnosti National Instrument. K tomu je zapotřebí hardwarové části virtuální instrumentace tvořené počítačem a jednotlivými měřicími kartami používající rozhraní PXI. Dále je zde nutno vytvořit program ve vývojovém prostředí LabVIEW s knihovnou Modulation toolkit, který nám bude obsluhovat jednotlivé hardwarové prvky, a zároveň bude sloužit jako uživatelské rozhraní mezi měřicím přístrojem a uživatelem. Tento program se tvoří za pomoci grafického programování ve vývojovém prostředí LabVIEW od společnosti National Instruments.

4.2 Grafické programování

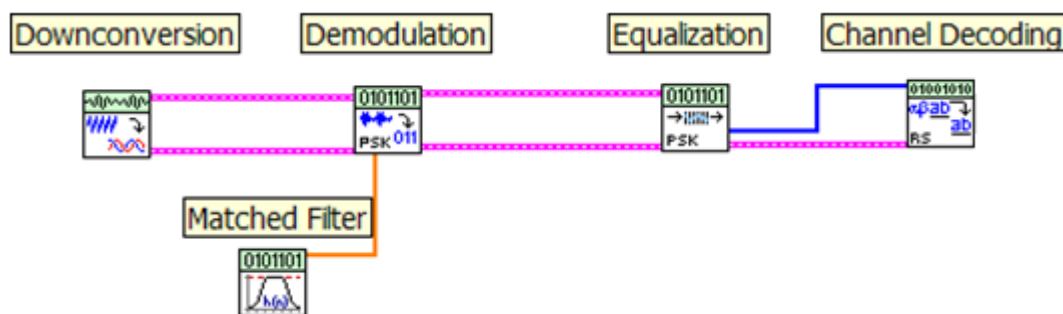
Softwarová část virtuální instrumentace přináší řadu výhod oproti klasické instrumentaci, jak již bylo zmíněno výše. Další velkou výhodou virtuální instrumentace je to, že je postavena na principu grafického programování s využíváním jednotlivých bloků. Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW je pro uživatele mnohem přívětivější a snazší, než je tomu u textového programování. Dále uživatel nepotřebuje znát programovací jazyk, ve kterém je software napsán, aby mohl vytvořit svůj vlastní program. To velmi usnadňuje práci ve vývojovém prostředí a šetří čas uživatele, což vedlo k nárůstu počtu uživatelů grafického programování. Program je zde tvořen pomocí jednotlivých bloků, které reprezentují určité kusy kódu, jenž slouží pro specifické účely. Propojením několika bloků dostaneme kostru programu, kde pak vkládáme jednotlivé funkce z knihoven jako je např. Modulation Toolkit, které v těchto vývojových prostředích mají i funkce pro

Blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.

podporu jednotlivých fází procesu měření a oprostují tak uživatele od nutnosti znát např. detaily komunikace měřicí karty s počítačem. Dále zde nutno vytvořit ovládací prvky, jež slouží k ovládání měření stejně, jako ovládací prvky na čelním panelu u klasické instrumentace.

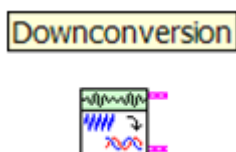
4.3 Blokové schéma pro zpracování přijímaného digitálně modulovaného signálu implementovaného do grafického vývojového prostředí LabVIEW

Blokové schéma vyobrazené na obrázku 4.2 je ekvivalentem blokového schématu uvedeného na obrázku 4.1, které je však implementováno do grafického vývojového prostředí LabVIEW rozšířeného o knihovnu Modulation toolkit. Toto schéma je určeno pro příjem digitálně modulovaného signálu, jenž byl modulován PSK modulací. Některé tyto bloky mohou být přímo obsaženy ve vývojovém prostředí LabVIEW, jiné bloky zobrazené na schématu jsou tvořeny mnoha bloky vytvořenými a zapojenými tak, aby právě plnily požadovanou funkci.



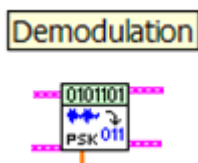
Obrázek 4.2: Blokové schéma příjmu digitálního signálu vyjádřeno v LabVIEW

Popis jednotlivých bloků:



Obrázek 4.3: Blok Downconversion

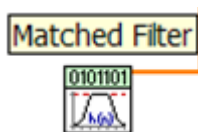
Blok Downconversion (viz Obr. 4.3) slouží pro konverzi signálu přijímaného anténou z frekvencí vyšších na frekvence nižší, které jsou vhodnější pro zpracování.



Obrázek 4.4: Blok Demodulation

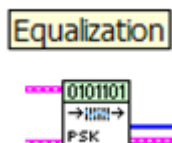
Tento blok (viz Obr. 4.4) slouží pro demulaci přijímaného modulovaného signálu na bitový tok pomocí znalostí konkrétního modulačního schématu.

Blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného signálu a jeho implementace do grafického vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit.



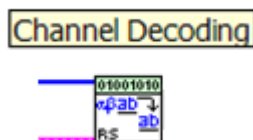
Obrázek 4.5: Matched Filter

Následující blok (viz Obr. 4.5) slouží pro nastavení parametrů filtru analyzující části tak, aby odpovídalo nastavení filtru na části vysílací.



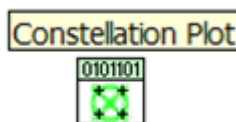
Obrázek 4.6: Blok Equalization

Blok Equalization (viz Obr. 4.6) slouží k ekvalizaci signálu, a pokud možno ke korekci chyb vzniklých při přenosu reálným přenosovým kanálem.



Obrázek 4.7: Channel Decoding

Channel Decoding (viz Obr. 4.7) slouží pro dekódování bitového toku na původní užitečnou informaci.



Obrázek 4.8: Blok Constellation Plot

Poslední blok (viz Obr. 4.8) přímo nesouvisí s příjmem digitálně modulovaného signálu, jelikož slouží k vykreslení konstatačního diagramu, ale je to vhodný nástroj při analýze digitálně modulovaného signálu.

5 Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

V této kapitole je popsán návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu do vývojového prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit. Tato aplikace pracuje na reálném hardware, který je založen na bázi modulárního systému PXI. Aplikace je tvořena ze dvou hlavních částí:

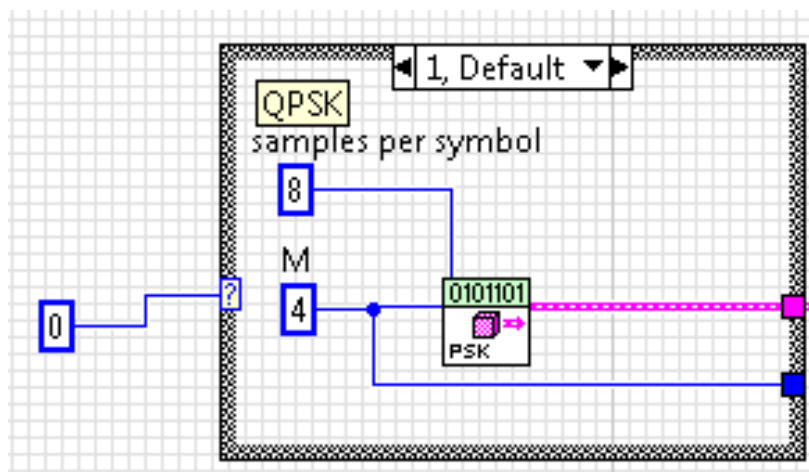
- Blokový diagram, který zde plní funkci vývojového prostředí založeného na bázi grafického programování.
- Čelní panel, který slouží jako uživatelské prostředí.

5.1 Popis jednotlivých bloků programu v blokovém diagramu

Zde jsou popsány jednotlivé části aplikace v blokovém diagramu

5.1.1 Blok pro specifikaci modulačního schématu

Blok pro specifikaci modulačního schématu (viz Obr. 5.1) slouží pro nastavení konkrétního modulačního schématu, které bude použito pro modulaci signálu. Slouží ke generování parametrů, jež určují jaké modulační schéma je použito, generuje symbolovou mapu a určuje počet stavů konkrétní modulační.



Obrázek 5.1: Blok pro specifikaci modulačního schématu

Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

5.1.2 Blok pro nastavení analyzátoru

Blok pro nastavení analyzátoru (viz Obr. 5.2) slouží pro vhodné nastavení jednotlivých parametrů analyzátoru, aby tak byla zajištěna požadovaná funkčnost. Dále jsou zde bloky, které ovládají hardwarové části analyzátoru.

VI niRFSA Initialize (1) slouží pro výběr portu, na kterém zařízení reálně pracuje a dále vytváří novou relaci mezi hardwarovými a softwarovou částí.

VI niRFSA Configure Ref Clock (2) nastavuje referenční hodiny sloužící pro synchronizaci.

VI niRFSA Configure Acquisition Type (3) konfiguruje relace, která obsahují I/Q data nebo vypočítané výkonové spektra pro nastavenou frekvenci.

VI niRFSA Configure Reference Level (4) nastavuje referenční úroveň očekávaného přijímaného signálu.

VI niRFSA Configure IQ Carrier Frequency (5) nastavuje nosnou frekvenci pro RF signál analyzátor pro.

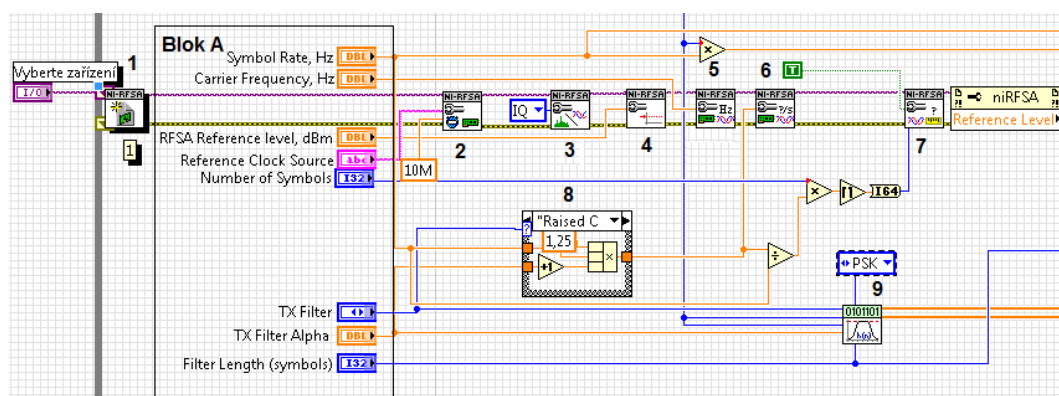
VI niRFSA Configure IQ Rate (6) konfiguruje rychlost s jakou aplikace vzorkuje I/Q data.

VI niRFSA Configure Number of Samples (7) určuje konečný počet získaných vzorků nebo nastavuje zařízení tak, aby získávalo neustále nové vzorky.

Blok s číslem 8 realizuje filtr a jeho variace, které může uživatel nastavit.

VI MT Generate Filter Coefficients (9) vypočítává koeficienty filtru pro použité filtry v aplikaci a aplikuje je v demodulaci.

Blok A obsahuje konstanty, které nastavuje uživatel a tak konfiguruje analyzátor.



Obrázek 5.2: Blok pro nastavení parametrů a hardwaru analyzátoru

Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

5.1.3 Blok pro příjem, měření a demodulaci signálu

Blok pro příjem, měření a demodulaci signálu obsahuje VI, které plní funkce pro příjem signálu, zasílání naměřeného signálu do paměti počítače, demodulace a výkonové vyhodnocení přijímaného signálu (viz .Obr 5.3).

VI niRFSA Initiate (1) zahajuje získávání I/Q dat. Toto VI spolupracuje také s VI niRFSA Fetch IQ (2) k načtení získaných dat do paměti počítače.

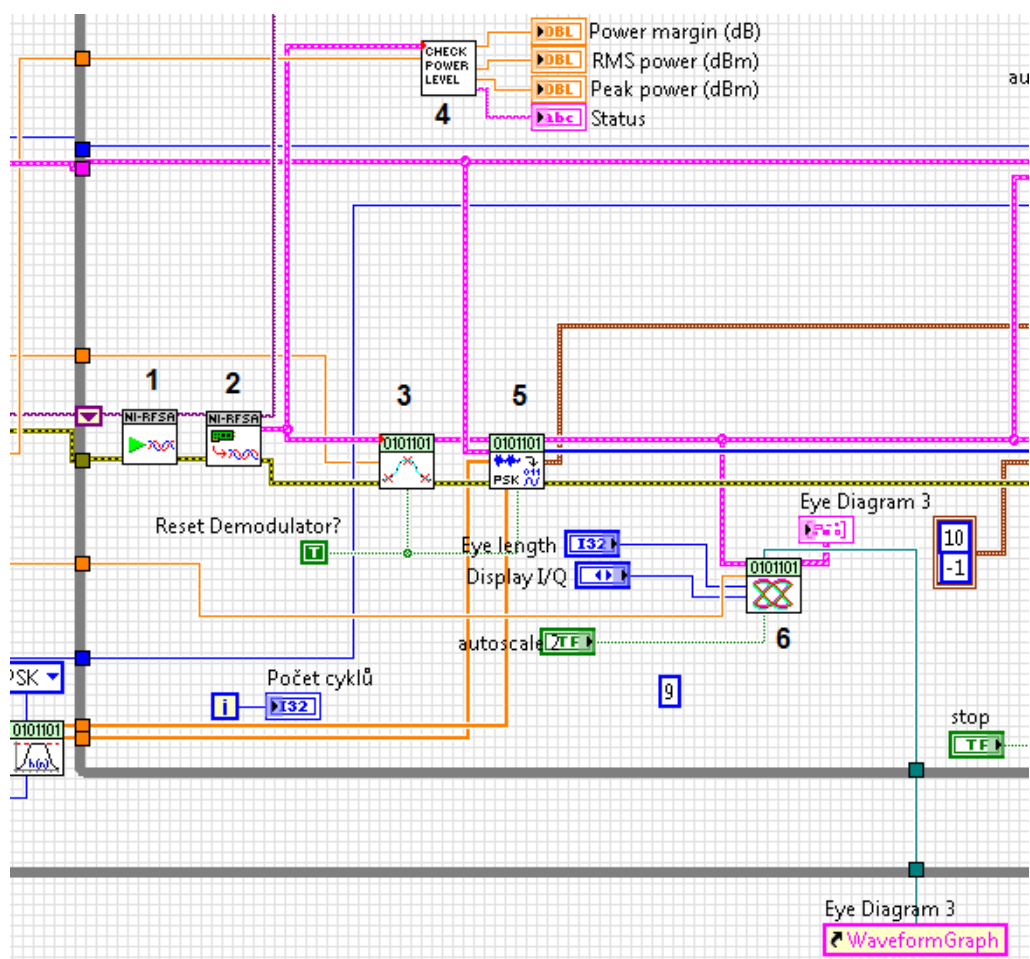
VI niRFSA Fetch IQ(2) přenáší získanou waveformu z paměti zařízení do paměti počítače.

VI MT Resample (3) určuje komplexní hodnotu konkrétní waveformy a dále waveformu převzorkovává a přeskupuje dle zadaných parametrů.

VI Check Power Level (4) slouží pro měření výkonových hodnot analyzovaného signálu a zobrazování těchto hodnot uživateli.

VI MT Demodulate PSK (5) demoduluje komplexní zmodulovanou waveformu za pomoci PSK demodulace na bitový tok. Dále měření konkrétní parametry demodulace.

VI MT Format Eye Diagram (6) vykresluje diagram oka analyzovaného signálu.



Obrázek 5.3: Blok pro příjem, měření a demodulaci signálu

Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

Blok pro analýzu, vyhodnocení a vizualizaci přijímaného signálu a ukončení aplikace“

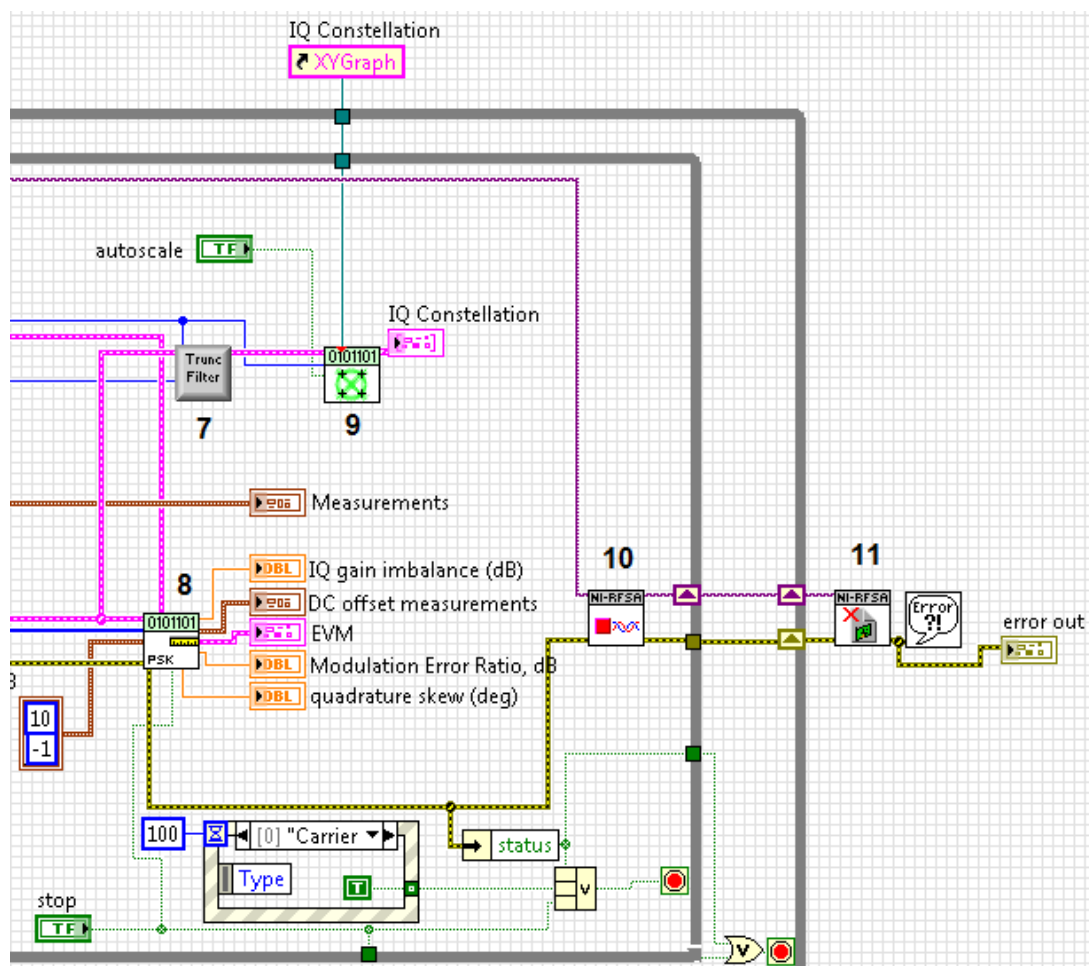
Blok pro analýzu, vyhodnocení přijímaného signálu a ukončení aplikace navazuje na předešlý blok měří určité parametry signálu a poté je zobrazuje do uživatelského prostředí aplikace.(viz Obr. 5.4) Vykresluje konstelační diagram a nakonec jsou zde i bloky sloužící pro zastavení a ukončení aplikace.

VI MT Measure Quadrature Impairments (7) měří kvadraturní chyby signálu a vypisuje konkrétní hodnoty do uživatelského prostředí.

VI MT Format Constellation (8) vykresluje konstelační diagram signálu.

VI niRFSA Abort (9) zastavuje získávání I/Q dat.

VI niRFSA Close (10) ukončuje vytvořenou relaci.

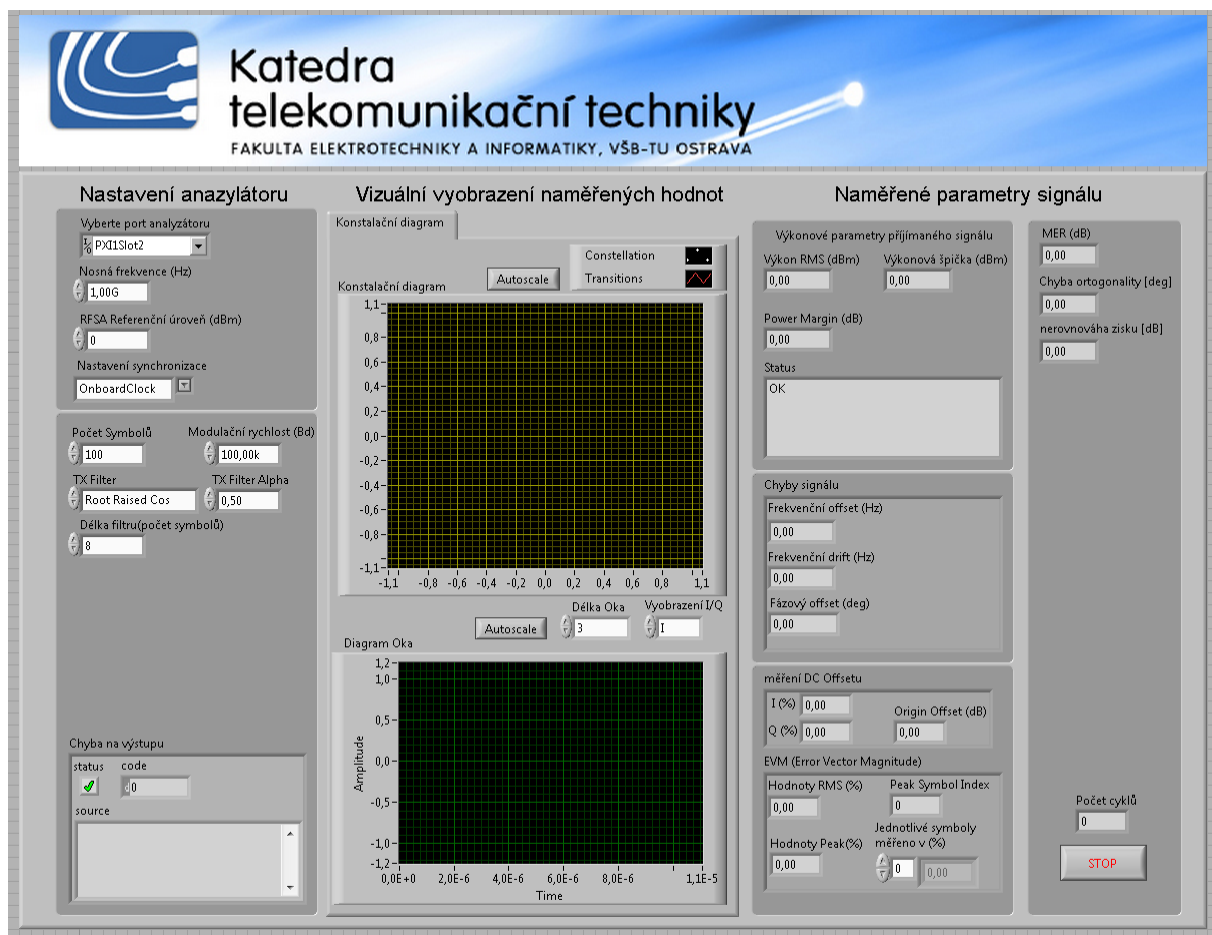


Obrázek 5.4: Blok pro analýzu, vyhodnocení přijímaného signálu a ukončení aplikace

Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

5.2 Popis jednotlivých bloků programu v uživatelském prostředí

Uživatelské prostředí (viz. Obr. 5.5) slouží k interakci mezi uživatelem a analyzátořem. Slouží pro nastavení parametrů analyzátoru, k vizuálnímu vyobrazení měřeného signálu a pro zobrazení naměřených hodnot. Uživatelské prostředí je rozděleno do tří částí (bloků). Každá část plní odlišnou úlohu v aplikaci.



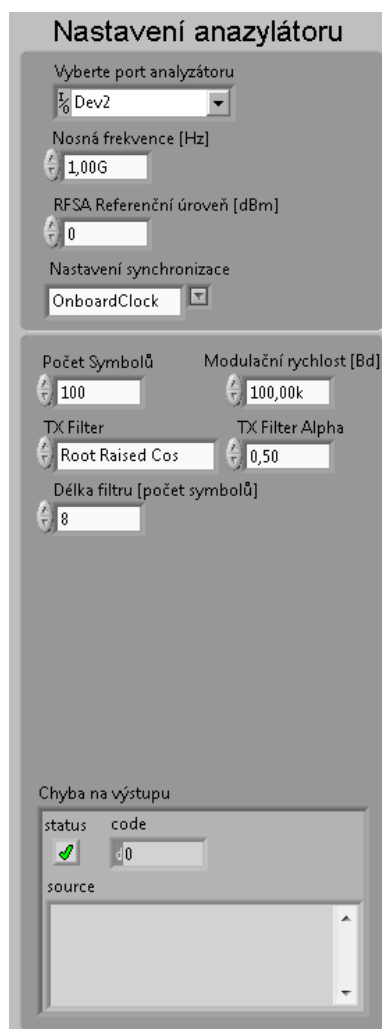
Obrázek 5.5: Celkový pohled na uživatelské prostředí aplikace

5.2.1 Blok nastavení analyzátoru

V této části aplikace (viz.. Obr.5.6) nastavujeme aplikaci tak, aby splňovala naše požadavky pro měření. Jako první je zde kolonka "Vyberte port analyzátoru", který slouží pro nastavení konkrétního portu hardwarové části a zajišťuje tak komunikaci mezi aplikací a hardwarovou částí.

Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

Dalším nastavitelným prvkem je "Nosná frekvence", jež slouží pro určení frekvence, na které chceme digitálně modulovaný signál přijímat. Následující "RFSA Referenční úroveň" slouží k nastavení referenční úrovně signálu. Pro nastavení synchronizace měřících zásuvných modulů slouží kolonka "Nastavení synchronizace". "Počet symbolů" slouží pro nastavení počtu stavů vykreslených do konstatačního diagramu. Pro zvolení měřené modulační rychlosti využijeme ovládací prvek "Modulační rychlost". Pro zvolení konkrétního druhu filtru využitého pro analýzu signálu je zde "TX Filtr". Pro konkrétnější nastavení filtru jsou zde ovládací prvky "TX Filtr Alpha" a "Délka filtru".



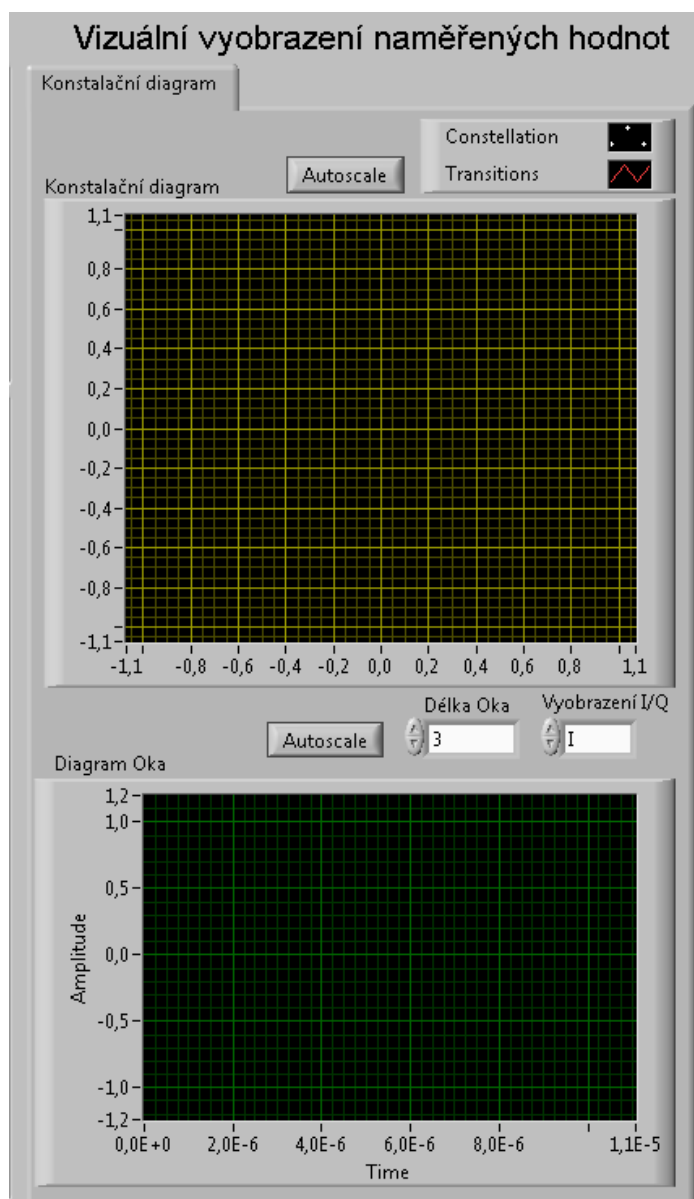
Obrázek 5.6: Nastavení analyzátoru v GUI aplikace

5.2.2 Blok pro vizuální vyobrazení naměřených hodnot

Tato část aplikace (viz.Obr 5.7) obsahuje IQ konstelační diagram a diagram oka. Oba tyto diagramy slouží k vyhodnocení měřeného signálu. U konstelačního diagramu je možné nastavit zobrazení pouze konstelačních bodů v diagramu nebo i přechodové cesty. Pro automatické nastavení

Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

os diagramu slouží tlačítko "autoscale". U diagramu oka je pak možno volit délku diagramu oka a zobrazení I nebo Q složky. Diagram oka také obsahuje tlačítko autoscale.



Obrázek 5.7: Vizuální část analýzy signálu

Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

5.2.3 Blok pro zobrazení naměřených parametrů signálu

Poslední blok aplikace (viz. Obr. 5.8) slouží pro vypsání konkrétních hodnot měřených parametrů analyzovaného signálu. Tato část je pro přehlednost rozdělena do několika menších bloků. Výkonové parametry přijímaného signálu nám uvádějí velikost výkonu přijímaného signálu. Status slouží ke zobrazování různých zpráv o signálu. Chyby signálu měří frekvenční offset, frekvenční drift a fázový offset signálu. Další měřené parametry jsou MER (viz. kapitola 2.12.1), Chyba ortogonality a nerovnováha zisku.

Naměřené parametry signálu

Výkonové parametry přijímaného signálu

Výkon RMS [dBm] Výkonová špička [dBm]

0,00 0,00

Power Margin [dB]

0,00

Status

OK

Chyby signálu

Frekvenční offset [Hz]

0,00

Frekvenční drift [Hz]

0,00

Fázový offset [Hz]

0,00

MER [dB]

0,00

Chyba ortogonality [deg]

0,00

nerovnováha zisku [dB]

0,00

Obrázek 5.8: Naměřené parametry signálu

Návrh a implementace aplikace pro analýzu digitálně modulovaného signálu na platformu vektor signálového analyzátoru na bázi PXI modulárního systému.

Na obrázku (viz. Obr. 5.9) vidíme druhou část bloku aplikace pro zobrazení naměřených parametrů signálu. Měření DC offsetu nám ukazuje měřenou polohu I a Q složky a její vzdálenost v procentech od polohy ideální. Jako poslední měřený parametr je EVM (viz. kapitola 2.12.2). Indikátor slouží vyobrazení počtu cyklů, kolikrát měření proběhlo, a tlačítko "STOP" sloužící pro zastavení programu.

The screenshot shows a software interface with two main panels. The left panel is titled "měření DC Offsetu" and contains input fields for "I [%]" (0,00), "Q [%]" (0,00), and "Origin Offset [dB]" (0,00). Below this is a section titled "EVM (Error Vector Magnitude)" with fields for "Hodnoty RMS [%]" (0,00), "Peak Symbol Index" (0), "Hodnoty Peak [%]" (0,00), and "Jednotlivé symboly měřeno v [%]" (0,00). A small circular icon with 'A' and 'V' is also present. The right panel contains a field for "Počet cyklů" (0) and a red "STOP" button.

Obrázek 5.9: Naměřené parametry signálu a tlačítko stop.

6 Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.

V této kapitole jsem se zabýval analýzou digitálně modulovaných signálů. Tyto signály byly záměrně rušeny na straně generátoru a byla prováděna analýza těchto signálů.

Vstupní degradace byla způsobena změnou těchto parametrů:

- Bílý šum
- Šumová hus
- Chyba ortogonality
- I DC offset
- Q DC offset
- Nerovnováha zisku

Měřené parametry uvedené do tabulek a grafů v této kapitole jsou MER (viz kap. 2.11.1) a EVM (viz kap. 2.11.2). EVM – RMS vyjadřuje střední hodnotu EVM. V přílohách je možno dohledat kompletní tabulky se všemi měřenými parametry.

6.1 Měřicí soustava

Měřicí soustava (viz Obr. 6.1) se skládá ze dvou PXI modulárních systému. PXI modulární systém na levé části obrázku slouží jako signál vektorový generátor (PXI-5670) a modulární PXI systém na pravé straně slouží jako vektor signálový analyzátor (PXI-5661). Signál vektorový generátor se skládá z kontroléru (PXI-8196), modulů upkonvertoru (PXI-5601) a generátoru libovolného průběhu (PXI-5421). Signál vektorový analyzátor se skládá z kontroléru (PXI-8106), downkonvertoru (PXI-5600) a rychlého digitizéru (PXI-5142). Tyto přístroje jsou propojeny koaxiálním kabelem sloužící jako přenosové medium. Signál vektorový analyzátor je ovládán mnou vytvořenou aplikací.



Obrázek 6.1: Měřicí soustava

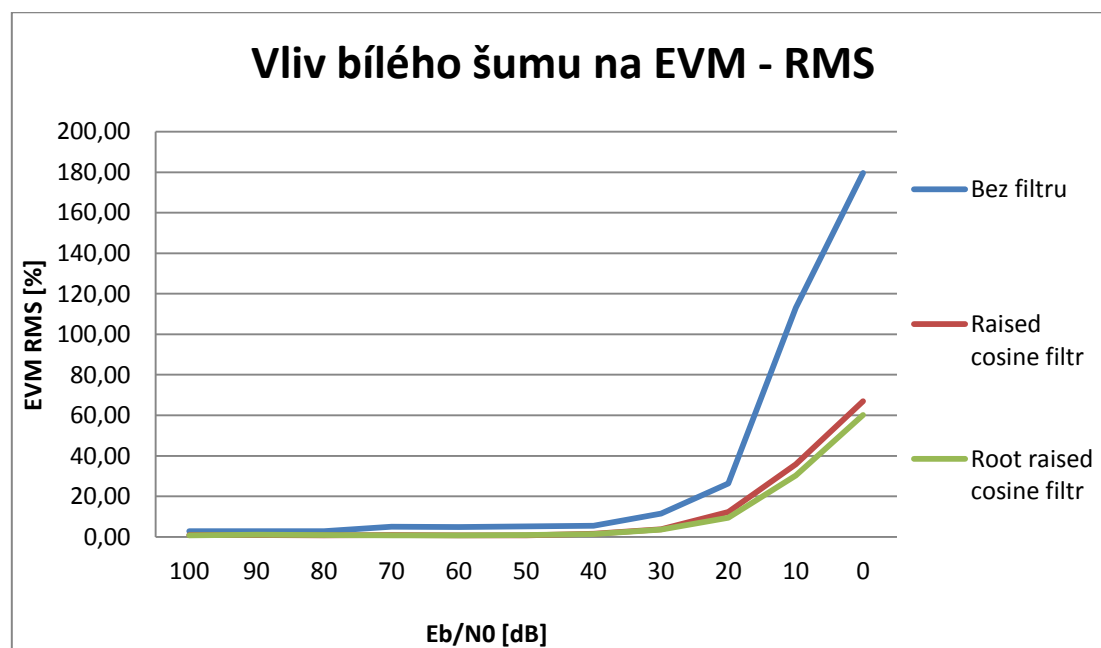
Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.

6.2 Měření vlivu bílého šumu.

V tomto měření jsem zjišťoval vliv bílého šumu na parametry MER a EVM při použití Raised cosine a Root raised cosine filtrů a také nefiltrovaného signálu.

Tabulka 6-1: Měření vlivu bílého šumu

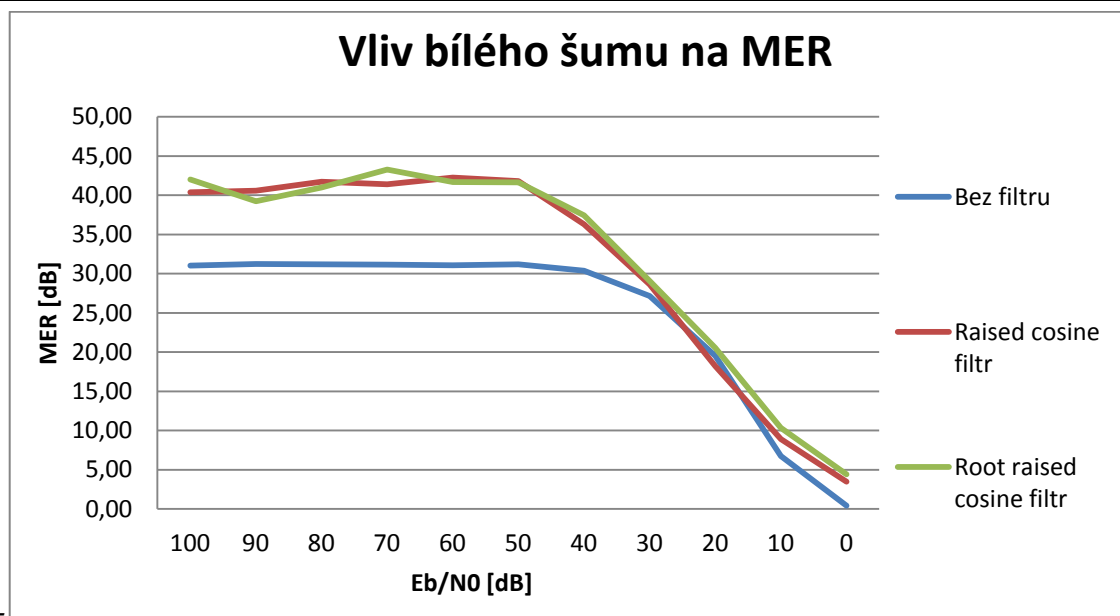
| | Bez filtru | | | Raised cosine filtr | | | Root raised cosine filtr | | |
|------------|------------|----------|---------|---------------------|----------|---------|--------------------------|----------|---------|
| | EVM | | | EVM | | | EVM | | |
| Eb/NO [db] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] |
| 100 | 31,04 | 5,22 | 2,74 | 40,39 | 2,01 | 0,96 | 42,01 | 1,86 | 0,79 |
| 90 | 31,22 | 5,38 | 2,75 | 40,60 | 2,23 | 0,93 | 39,23 | 2,65 | 1,09 |
| 80 | 31,19 | 5,53 | 2,76 | 41,71 | 1,94 | 0,82 | 41,01 | 2,16 | 0,89 |
| 70 | 31,15 | 2,77 | 4,96 | 41,39 | 2,00 | 0,85 | 43,29 | 1,51 | 0,68 |
| 60 | 31,06 | 2,80 | 4,91 | 42,27 | 1,67 | 0,77 | 41,67 | 1,72 | 0,82 |
| 50 | 31,19 | 2,76 | 5,24 | 41,82 | 2,05 | 0,81 | 41,63 | 2,15 | 0,83 |
| 40 | 30,38 | 3,03 | 5,44 | 36,30 | 4,22 | 1,53 | 37,45 | 3,03 | 1,34 |
| 30 | 27,15 | 4,37 | 11,49 | 28,61 | 9,00 | 3,71 | 29,08 | 8,09 | 3,52 |
| 20 | 19,52 | 10,56 | 26,35 | 18,21 | 32,75 | 12,29 | 20,56 | 22,25 | 9,38 |
| 10 | 6,76 | 45,91 | 113,08 | 8,93 | 100,58 | 35,77 | 10,35 | 90,09 | 30,37 |
| 0 | 0,41 | 95,35 | 179,65 | 3,49 | 178,15 | 66,90 | 4,41 | 139,01 | 60,21 |



Obrázek 6.2: Vliv bílého šumu na EVM – RMS

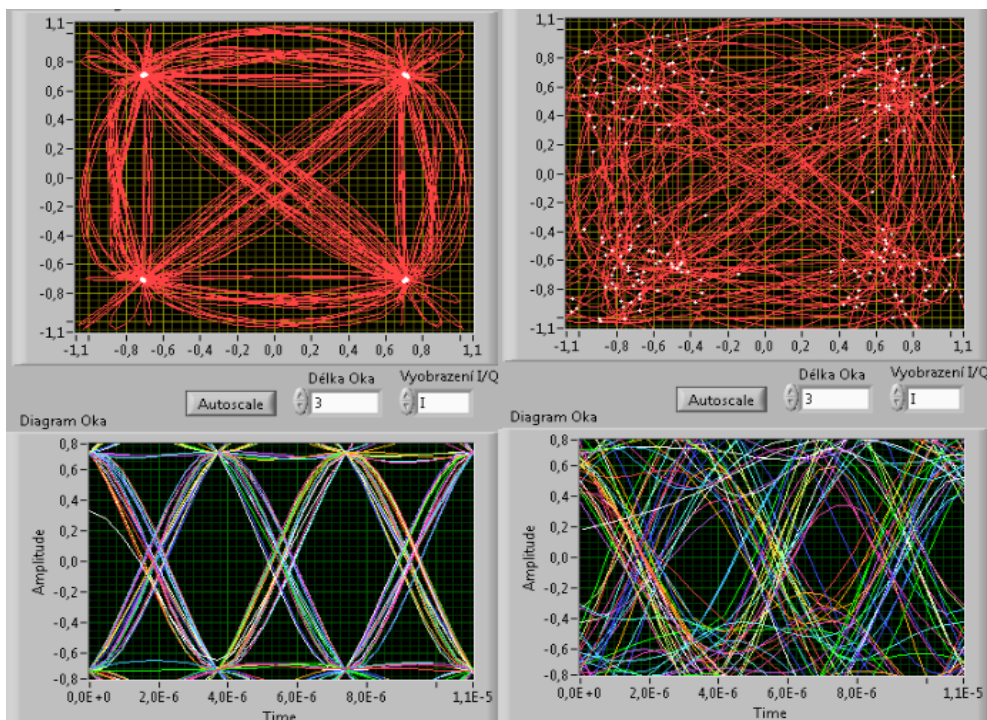
Graf (viz. Obr. 6.2) vyjadřuje vliv bílého šumu na EVM – RMS. Nejvíce byl ovlivněný signál bez použití filtru kde EVM – RMS při hodnotě 0 dB dosahuje hodnoty 180 %, zatímco u signálu s použitím Raised cosine filtrem je hodnota EVM – RMS 67 % a pro signál s použitým Root raised cosine je hodnota EVM – RMS 60 %. Vliv bílého šumu se začíná projevovat od hodnoty 35 dB.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.3: Vliv bílého šumu na MER

Na grafu (viz. Obr 6.3) vidíme, že bílý šum ovlivňuje výrazně hodnotu MER. Nejvíce ovlivněný byl signál bez použitého filtru, který při hodnotě 0 dB dosahoval hodnoty MER 0,41 dB. Signál s použitým filtrem Raised cosine při stejné úrovni šumu dosahoval hodnoty MER 3,5 dB. U posledního měřeného signálu, kde byl použit Root raised cosine filtr, při hodnotě bílého šumu 0 dB, byla naměřena hodnota MER 4,41 dB.



Obrázek 6.4: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka

Pro porovnání je zde vložen obrázek (viz. Obr. 6.4), kde v levé části obrázku vidíme konstatační diagram a diagram oka při hodnotě bílého šumu $\frac{E_b}{N_0} = 0 \text{ dB}$. Tyto diagramy nejeví

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.

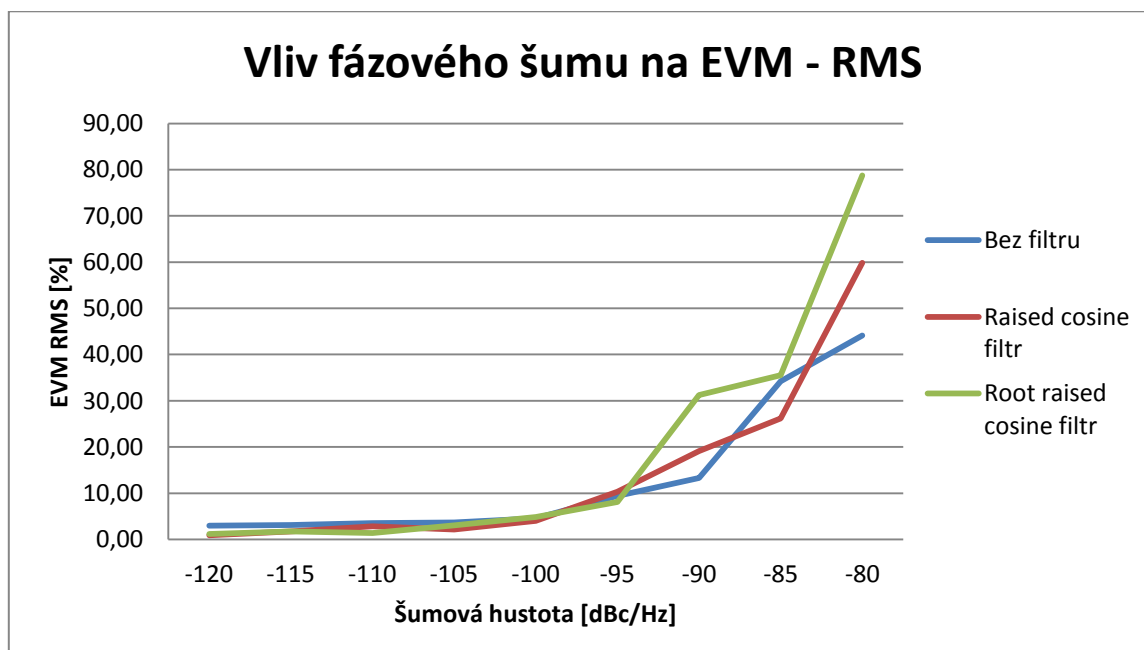
jakékoliv známky deformace, ale při hodnotě bílého šumu $\frac{Eb}{No} = 0 \text{ dB}$ je konstatační diagram značně deformovaný a jednotlivé stavové body nelze téměř detekovat. Diagram oka se rovněž uzavírá a tak indikuje velkou deformaci signálu.

6.3 Měření vlivu fázového šumu

V tomto měření jsem sledoval vliv fázového šumu na parametry MER a EVM při použití Raised cosine a Root raised cosine filtrů a také nefiltrovaného signálu.

Tabulka 6-2: Měření vlivu šumové hustoty

| Šumová hustota [dBc/Hz] | Bez filtru | | | Raised cosine filtr | | | Root raised cosine filtr | | |
|----------------------------|-------------|-------------|------------|---------------------|-------------|------------|--------------------------|-------------|------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] |
| -120 | 30,56 | 7,34 | 2,96 | 40,76 | 2,03 | 0,92 | 38,77 | 2,97 | 1,15 |
| -115 | 30,11 | 6,78 | 3,12 | 35,31 | 4,02 | 1,72 | 35,36 | 5,48 | 1,71 |
| -110 | 29,00 | 6,82 | 3,55 | 30,85 | 5,71 | 2,87 | 37,16 | 4,07 | 1,39 |
| -105 | 28,77 | 8,94 | 3,64 | 33,25 | 5,11 | 2,17 | 30,43 | 7,64 | 3,01 |
| -100 | 26,76 | 11,57 | 4,59 | 27,87 | 11,49 | 4,04 | 26,28 | 17,47 | 4,85 |
| -95 | 20,50 | 35,04 | 9,44 | 19,72 | 23,51 | 10,33 | 21,82 | 21,51 | 8,11 |
| -90 | 17,51 | 35,91 | 13,32 | 14,39 | 46,34 | 19,08 | 10,11 | 68,21 | 31,21 |
| -85 | 9,32 | 72,46 | 34,19 | 11,63 | 64,08 | 26,21 | 9,00 | 98,87 | 35,50 |
| -80 | 7,11 | 118,70 | 44,09 | 4,46 | 167,76 | 59,83 | 2,07 | 174,76 | 78,76 |

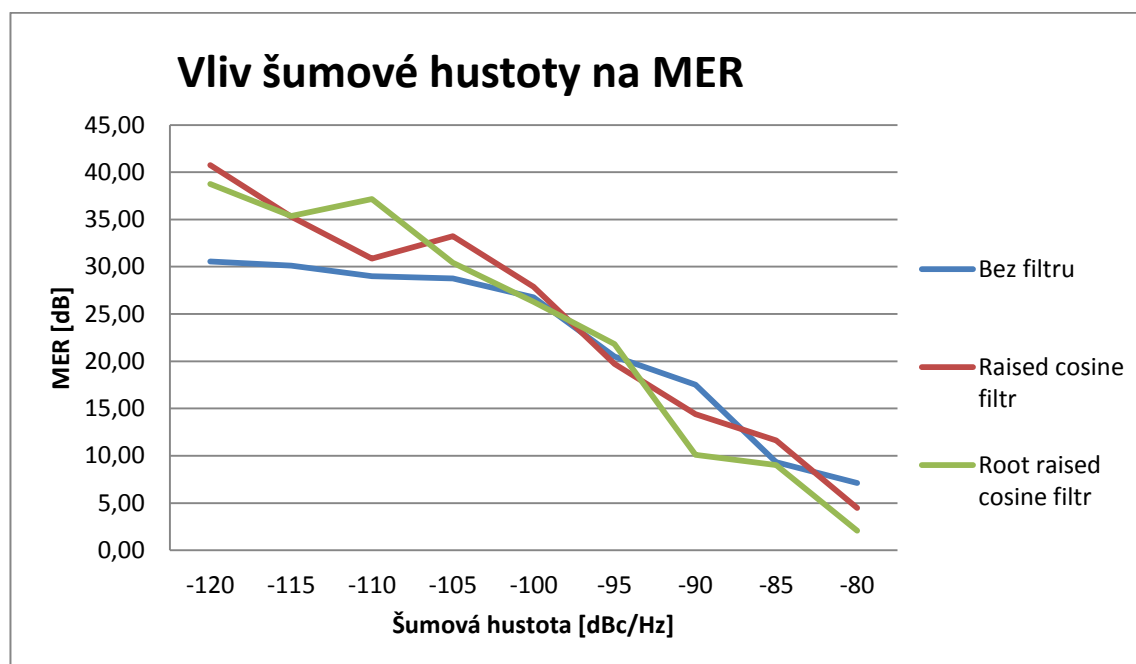


Obrázek 6.5: Vliv fázového šumu na EVM – RMS

Na grafu (viz. Obr. 6.5) vidíme že, fázový šum nejvíce ovlivňuje signál při použití Root raised cosine filtru, jenž při hodnotě šumové hustoty -80 dB/Hz dosahoval hodnoty EVM – RMS 78,76 %. Při stejné hodnotě fázového šumu signál při použití Raised cosine filtru vykazuje hodnotu EVM – RMS 59,83 %. Nejméně ovlivněný signál byl signál bez použití filtru. Tento signál dosahoval

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.

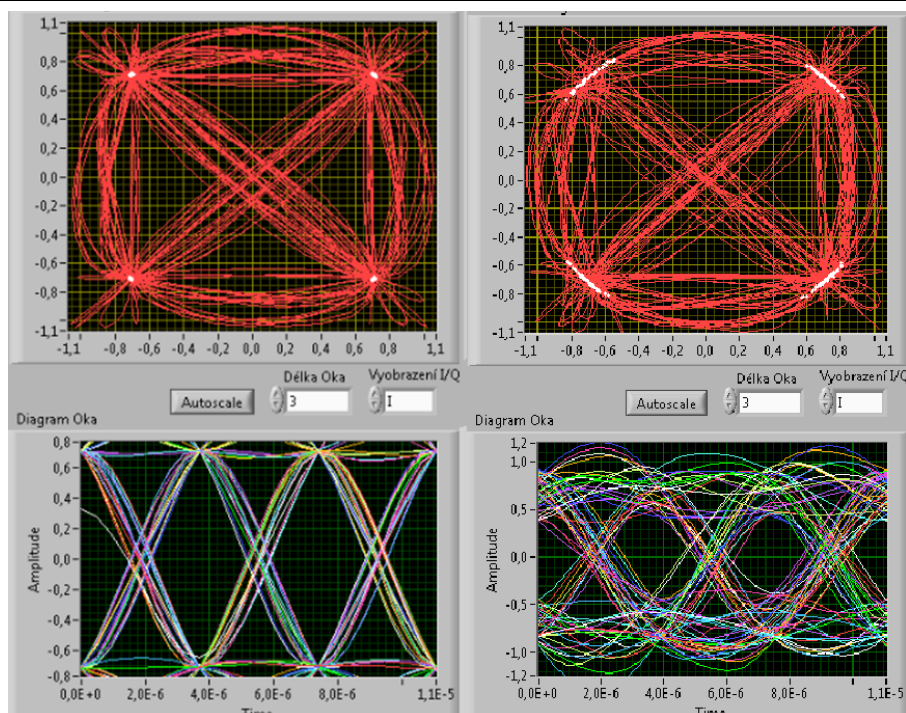
hodnoty EVM – RMS 44,1 %. Vliv fázového šumu se začal výrazněji projevovat na signálu od hodnoty -100 dBc/Hz.



Obrázek 6.6: Vliv šumové hustoty na MER

Z grafu (viz. Obr. 6.6) vidíme že, hodnotu MER fázový šum nejvíce ovlivňuje signál při použitím Root raised cosine filtru, jenž při hodnotě šumové hustoty -80 dB/Hz dosahovaly hodnoty MER 2,07 dB. Při stejné hodnotě fázového šumu signál při použitím Root cosine filtru vykazuje hodnotu MER 4,46 dB. Nejméně ovlivněný signál byl signál bez použití filtru. Tento signál dosahoval hodnoty MER 7,11 dB. Vliv fázového šumu se začal výrazněji projevovat u signálu s použitými filtry od hodnoty -105 dBc/Hz na signálu bez použitého filtru od hodnoty -100 dBc/Hz.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.7: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu šumové hustoty

Na obrázku (viz. Obr 6.7) vidíme porovnání jednotlivých diagramů signálu, kde byl použit Root raised cosine filtr. Při hodnotě fázového šumu -120dBc/Hz (levá část) a hodnotě fázového šumu -95dBc/Hz (prává část). Diagramy na levé části jsou téměř ideálního tvaru, ale diagramy na pravé straně vykazují jistotou chybovost a liší se od ideálního tvaru.

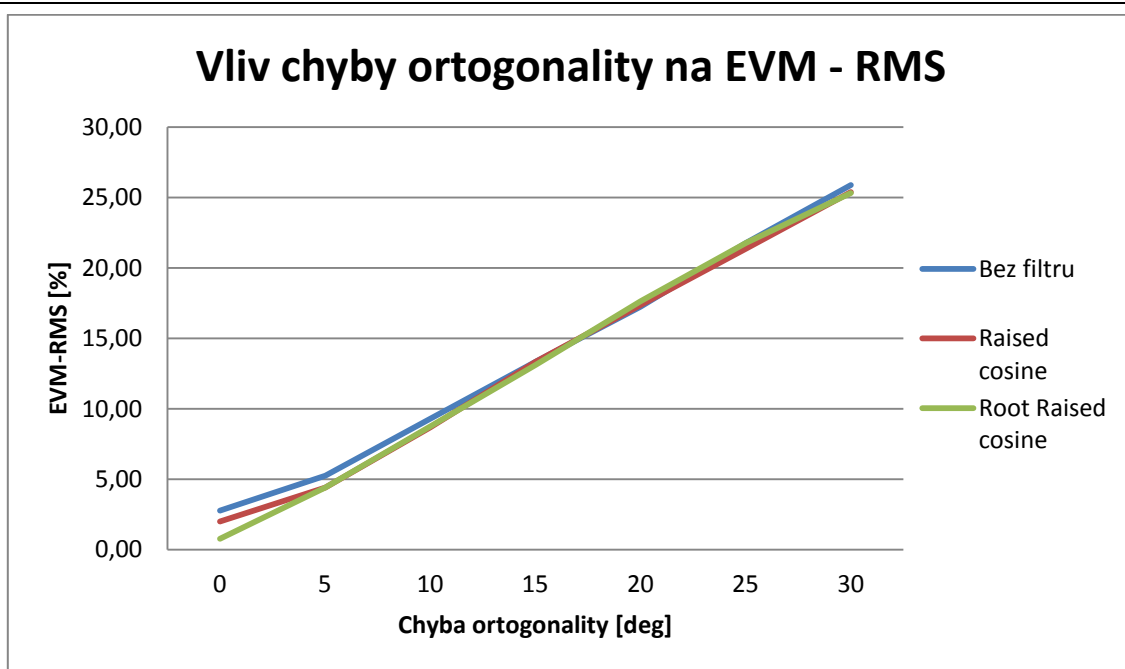
6.4 Měření vlivu chyby ortogonality

V tomto měření jsem zjišťoval vliv chyby ortogonality na parametry MER a EVM při použití Raised cosine a Root raised cosine filtrů a také nefiltrovaného signálu.

Tabulka 6-3: Měření vlivu chyb ortogonality

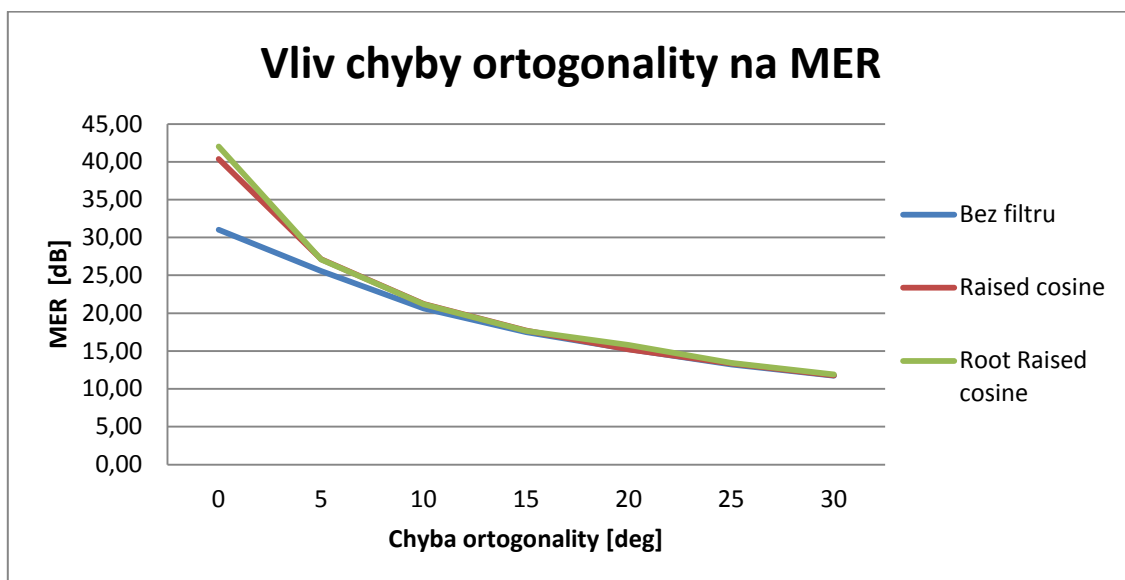
| | Bez filtru | | | Raised cosine | | | Root Raised cosine | | |
|--------------------------|------------|----------|---------|---------------|----------|---------|--------------------|----------|---------|
| | EVM | | | EVM | | | EVM | | |
| Chyba ortogonality [deg] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] |
| 0 | 31,04 | 4,99 | 2,78 | 40,39 | 0,96 | 2,01 | 42,01 | 1,86 | 0,79 |
| 5 | 25,58 | 9,22 | 5,26 | 27,13 | 5,48 | 4,41 | 27,10 | 5,12 | 4,41 |
| 10 | 20,63 | 13,68 | 9,30 | 21,23 | 10,32 | 8,68 | 21,16 | 10,17 | 8,75 |
| 15 | 17,49 | 17,56 | 13,35 | 17,69 | 14,30 | 13,34 | 17,65 | 14,81 | 13,11 |
| 20 | 15,27 | 22,60 | 17,24 | 15,21 | 18,73 | 17,36 | 15,80 | 22,60 | 17,63 |
| 25 | 13,24 | 26,60 | 21,77 | 13,33 | 25,03 | 21,35 | 13,45 | 25,75 | 21,77 |
| 30 | 11,76 | 31,66 | 25,87 | 11,78 | 28,90 | 25,37 | 11,90 | 30,60 | 25,32 |

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.8: Vliv chyby ortogonality na EVM - RMS

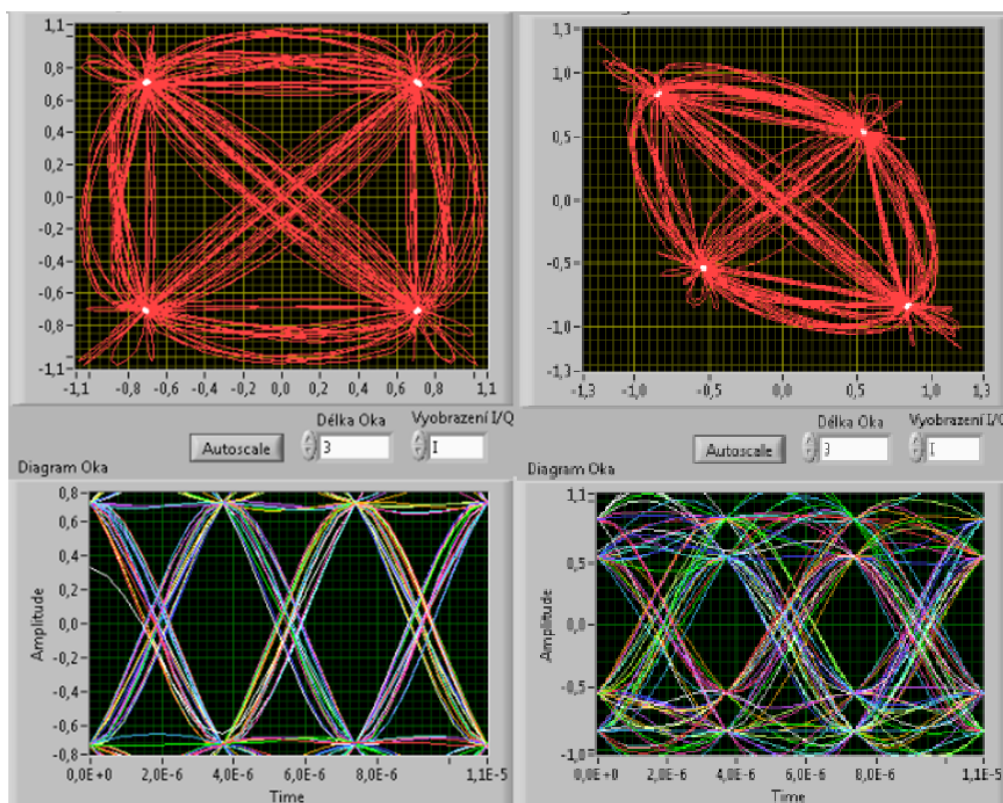
Na grafu (viz. Obr 6.8) vidíme vyobrazení vlivu chyby ortogonality na EVM – RMS. Z grafu vyplývá, že použití filtru na signál mělo jen minimální vliv na hodnotu EVM – RMS při zvyšující se chybě ortogonality. Při velikosti chyby ortogonality 30 deg bylo hodnota EVM – RMS 25,32% - 25,87%. Chyba ortogonality má vcelku lineární vliv na EVM – RMS.



Obrázek 6.9: Vliv chyby ortogonality na MER

Vliv chyby ortogonality na parametr MER je grafický znázorněn na grafu (viz. Obr 6.9). Použití filtru zde mělo vliv pouze na počáteční hodnoty MER. Při zvyšující se chybě ortogonality se hodnoty MER u všech měřených signálů téměř sjednotily. Při hodnotě 30 deg chyby ortogonality byly hodnoty MER 11,76 dB – 11,90 dB.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.10: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu chyby ortogonality

Na obrázku (viz. Obr. 6.10) vidíme dvě řady diagramů. Na levé straně je signál bez jakéhokoli rušení a proto je konstelační diagram a diagram oka bez jakékoli chyby. Na pravé straně je hodnota chyby ortogonality 25 deg. Lze vidět, že konstelační diagram je kvadrátově zkosený přibližně o 25°. Diagram oka vykazuje deformaci signálů a oko diagramu je zmenšené.

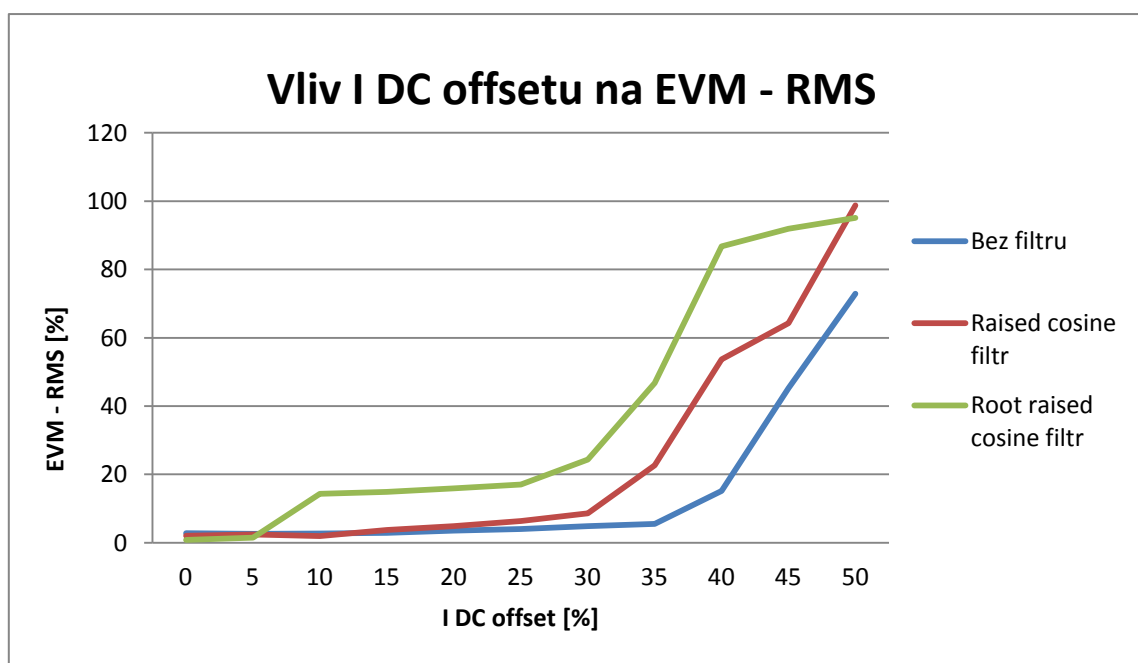
Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.

6.5 Měření vlivu I DC offsetu

V tomto měření jsem zjišťoval vliv I DC offsetu na parametry MER a EVM při použití Raised cosine a Root raised cosine filtrů a také nefiltrovaného signálu.

Tabulka 6-4: Měření vlivu I DC offsetu

| | Bez filtru | | | Raised cosine filtr | | | Root raised cosine filtr | | |
|-----------------|------------|----------|---------|---------------------|----------|---------|--------------------------|----------|---------|
| | EVM | | | EVM | | | EVM | | |
| I DC offset [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] |
| 0 | 31,04 | 4,99 | 2,78 | 40,39 | 0,96 | 2,01 | 42,01 | 1,86 | 0,79 |
| 5 | 28,81 | 5,4 | 2,64 | 29,41 | 1,86 | 2,45 | 31,70 | 3,64 | 1,46 |
| 10 | 30,96 | 5,41 | 2,74 | 34,22 | 3,46 | 1,95 | 18,55 | 26,54 | 14,30 |
| 15 | 30,78 | 5,98 | 2,89 | 29,17 | 5,46 | 3,76 | 16,39 | 27,61 | 14,89 |
| 20 | 29,04 | 6,4 | 3,53 | 26,23 | 8,30 | 4,83 | 14,25 | 28,77 | 15,89 |
| 25 | 27,64 | 6,88 | 4,01 | 22,89 | 11,57 | 6,39 | 13,01 | 29,29 | 17,01 |
| 30 | 26,29 | 9,45 | 4,85 | 21,28 | 14,34 | 8,63 | 12,88 | 30,12 | 24,35 |
| 35 | 25,74 | 9,01 | 5,55 | 17,03 | 39,77 | 22,64 | 9,72 | 68,18 | 46,71 |
| 40 | 24,16 | 9,91 | 15,2 | 5,41 | 109,05 | 53,67 | 2,27 | 100,98 | 86,73 |
| 45 | 16,97 | 98,14 | 45,21 | 2,96 | 140,97 | 64,26 | 1,22 | 134,96 | 91,95 |
| 50 | 2,75 | 192,1 | 72,9 | 1,17 | 178,45 | 98,78 | 1,14 | 145,74 | 95,12 |

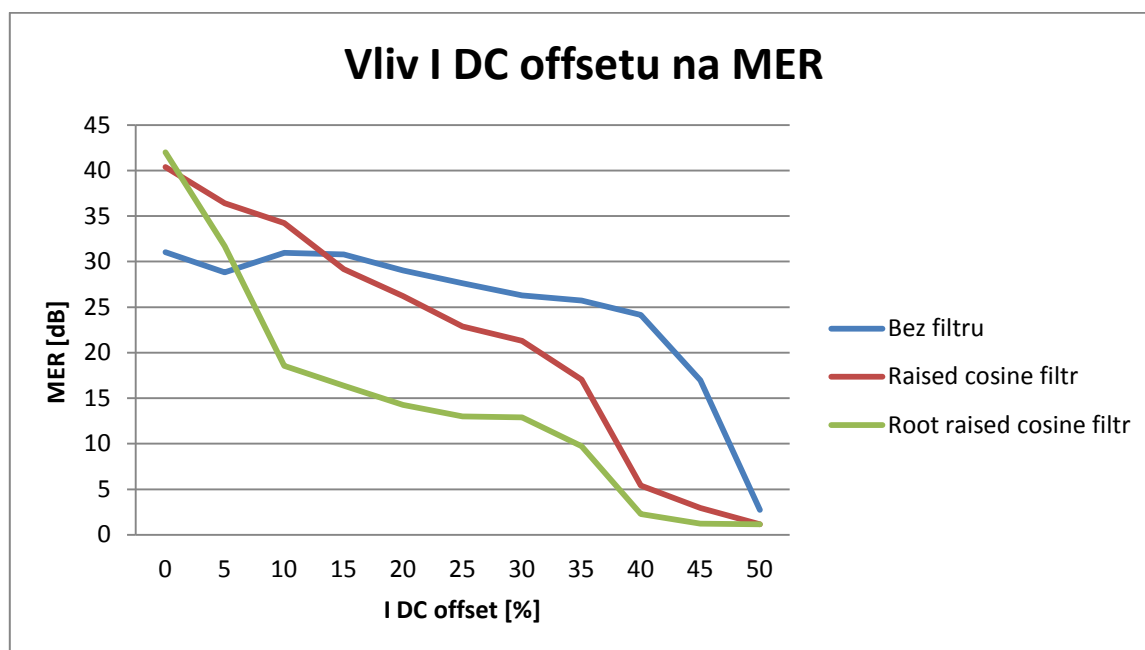


Obrázek 6.11: Vliv I DC offsetu na EVM - RMS

Graf (viz. Obr. 6.11) zobrazuje vliv I DC offsetu na EVM – RMS. Signál bez použitého filtru vykazoval nejvyšší hodnoty EVM – RMS. Hodnota EVM RMS byla 72,93 % při hodnotě 50 % I DC offsetu. Dokud hodnota I DC offset nedosáhla 35% vliv na EVM – RMS byl minimální. Signál s použitím filtrem Root raised cosine při maximální hodnotě I DC je EVM - RMS 95,12 %. Zvyšování

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.

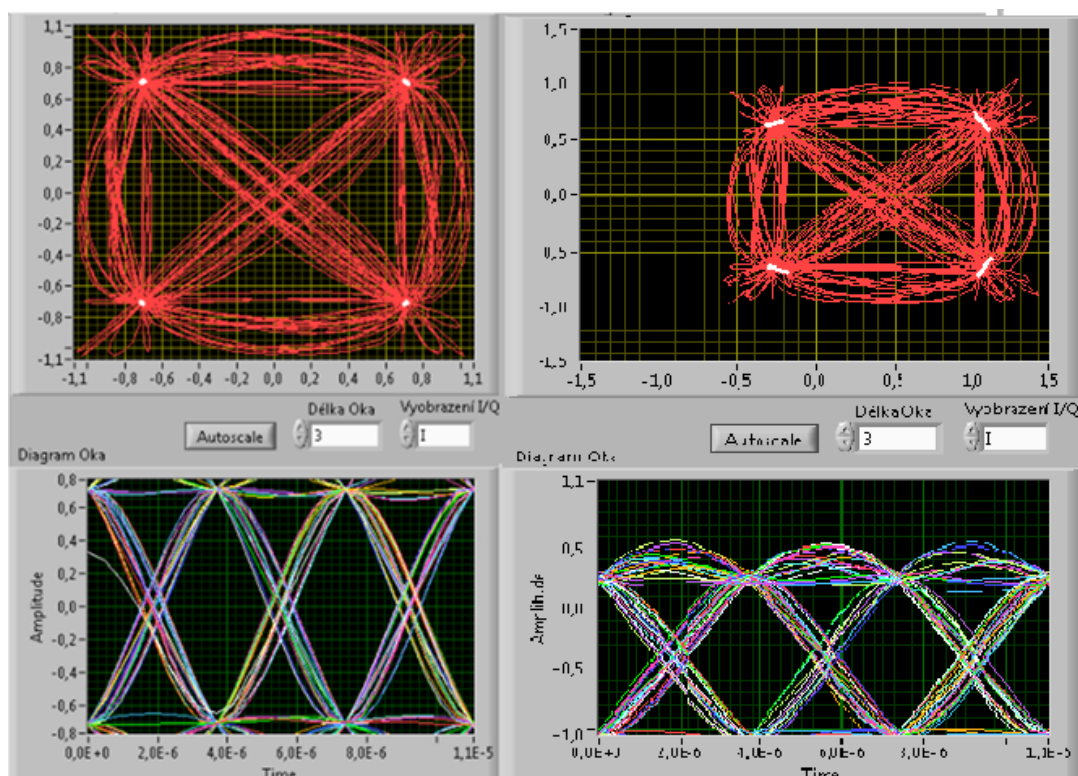
chybovosti EVM – RMS začalo u hodnoty I DC offsetu již na 5%. Poslední signál, kde byl použit Raised cosine filtr vykazuje hodnoty EVM – RMS 98,78 %. Zde se projevila chyba I DC offsetu již při hodnotě 30 %.



Obrázek 6.12: Vliv I DC offsetu na MER

Na znázorněném grafu (viz Obr. 6.12) vidíme závislost vlivu I DC offsetu na MER. Nefiltrovaný signál byl ze všech měřených signálů chybou I DC offsetu ovlivňován nejméně. I když při maximální hodnotě I DC offsetu je hodnota MER téměř stejná jako u ostatních signálů, tak během zvyšování I DC offsetu byly hodnoty MER vyšší než u signálu filtrovaného Raised cosine filtrem a výrazně vyšší než u signálu filtrovaného Root raised cosine filtrem.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.13: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu I DC offsetu

Při porovnání diagramů (viz. Obr. 6.13) je opět na levé straně signál bez rušení. I DC offset posunuje konstelační diagram od ideální polohy směrem doprava, což snižuje čitelnost a správné vyhodnocení signálu.

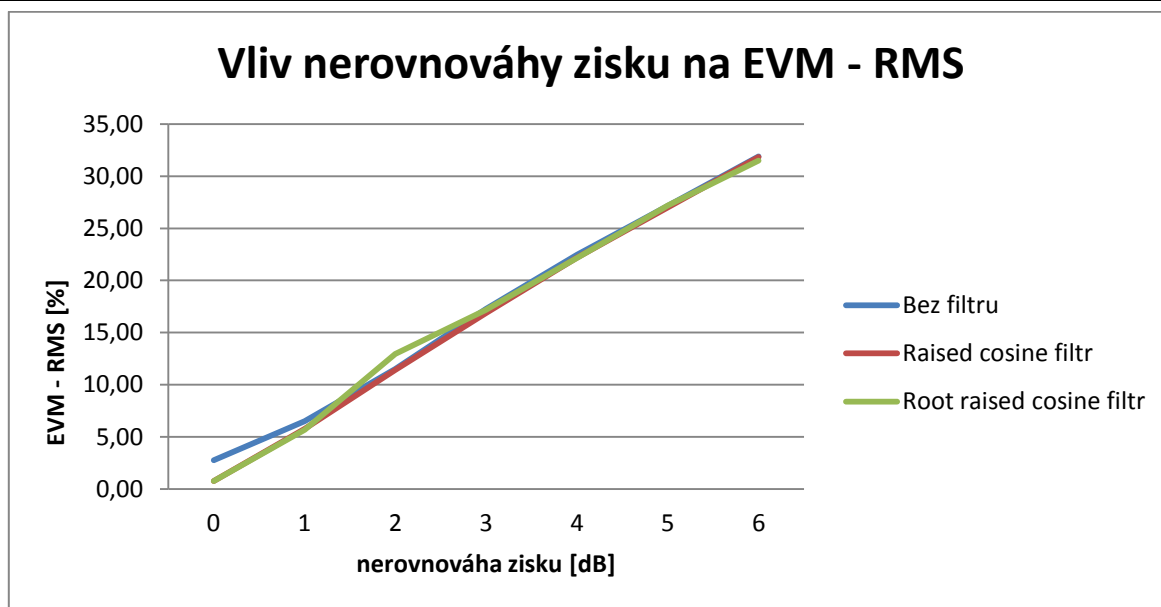
6.6 Měření vlivu nerovnováhy zisku

V tomto měření jsem zjišťoval vliv nerovnováhy zisku na parametry MER a EVM při použití Raised cosine a Root raised cosine filtrů a také nefiltrovaného signálu.

Tabulka 6-5: Měření vlivu nerovnováhy šumu

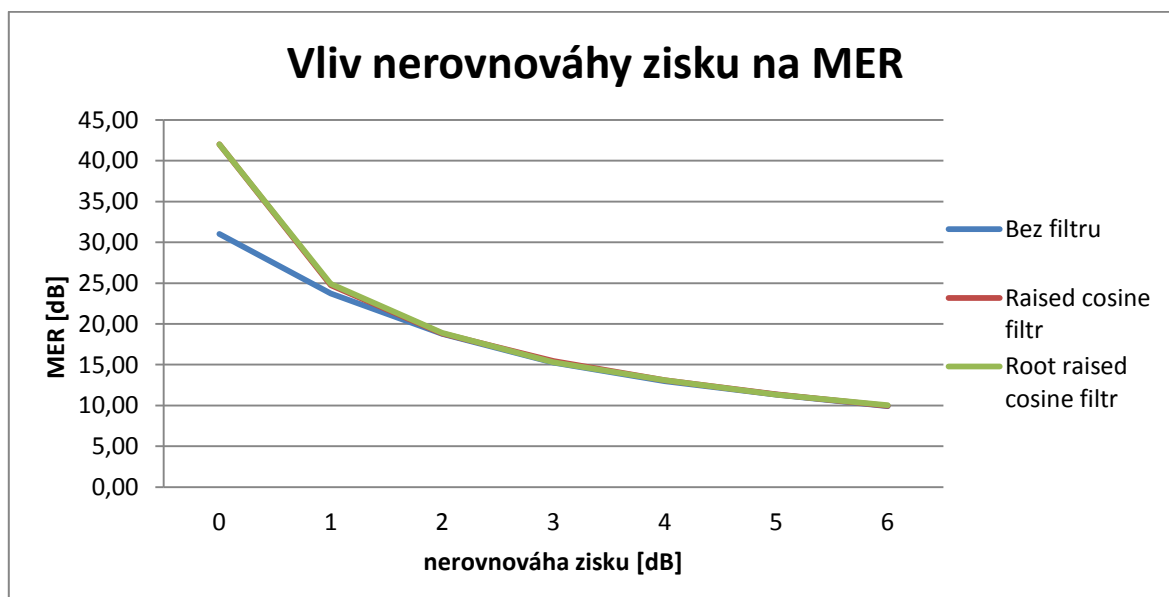
| | Bez filtru | | | Raised cosine filtr | | | Root raised cosine filtr | | |
|---------------------------|-------------|-------------|------------|---------------------|-------------|------------|--------------------------|-------------|------------|
| | | EVM | | | EVM | | | EVM | |
| nerovnováha zisku [dB] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] |
| 0 | 31,04 | 4,99 | 2,78 | 42,01 | 1,86 | 0,79 | 42,01 | 1,86 | 0,79 |
| 1 | 23,72 | 11,06 | 6,52 | 24,75 | 7,92 | 5,79 | 24,89 | 7,31 | 5,70 |
| 2 | 18,77 | 18,49 | 11,52 | 18,84 | 14,13 | 11,43 | 18,91 | 11,34 | 12,95 |
| 3 | 15,25 | 23,17 | 17,27 | 15,45 | 21,47 | 16,88 | 15,29 | 21,85 | 17,20 |
| 4 | 12,98 | 30,78 | 22,48 | 13,08 | 24,72 | 22,19 | 13,09 | 25,74 | 22,17 |
| 5 | 11,32 | 36,73 | 27,16 | 11,37 | 34,63 | 27,02 | 11,31 | 31,70 | 27,20 |
| 6 | 9,92 | 37,65 | 31,90 | 9,94 | 36,87 | 31,84 | 10,04 | 44,69 | 31,48 |

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.14: Vliv nerovnováhy zisku na EVM - RMS

Na grafu (viz. Obr 6.14) vidíme vyobrazení vlivu chyby ortogonalit na EVM – RMS. Z grafu vyplývá, že použití filtru na signál mělo jen minimální vliv na hodnotu EVM – RMS při zvyšující se chybě ortogonalit. Při velikosti chyby ortogonalit 6dB bylo hodnota EVM – RMS 31,48 % -37,65 %. Chyba ortogonalit má vcelku lineární vliv na EVM – RMS.

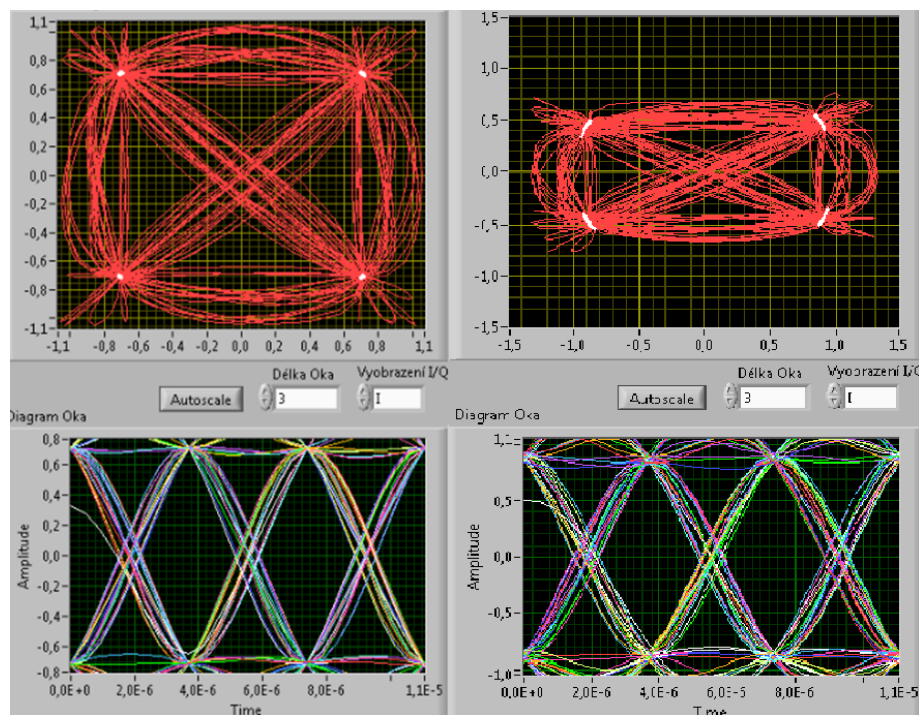


Obrázek 6.15: Vliv nerovnováhy zisku na MER

Vliv chyby nerovnováhy zisku na parametr MER je grafický znázorněn na grafu (viz. Obr 6.15). Použití filtru zde mělo vliv pouze na počáteční hodnoty MER. Při zvyšující se chybě

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.

ortogonalita se hodnoty MER u všech měřených signálů téměř sjednotily. Při hodnotě 6 dB chyby ortogonalita byly hodnoty MER 9,92 dB – 10,04 dB.



Obrázek 6.16: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu nerovnováhy zisku

Na obrázku (viz. Obr. 6.16) vidíme dvě řady diagramů. Na levé straně je signál bez jakéhokoli rušení a proto je konstelační diagram a diagram oka bez jakékoli chyby. Na pravé straně je hodnota nerovnováhy zisku 5 dB. Lze vidět, že konstelační diagram změnil poměr stran. Diagram oka vykazuje malou deformaci signálů.

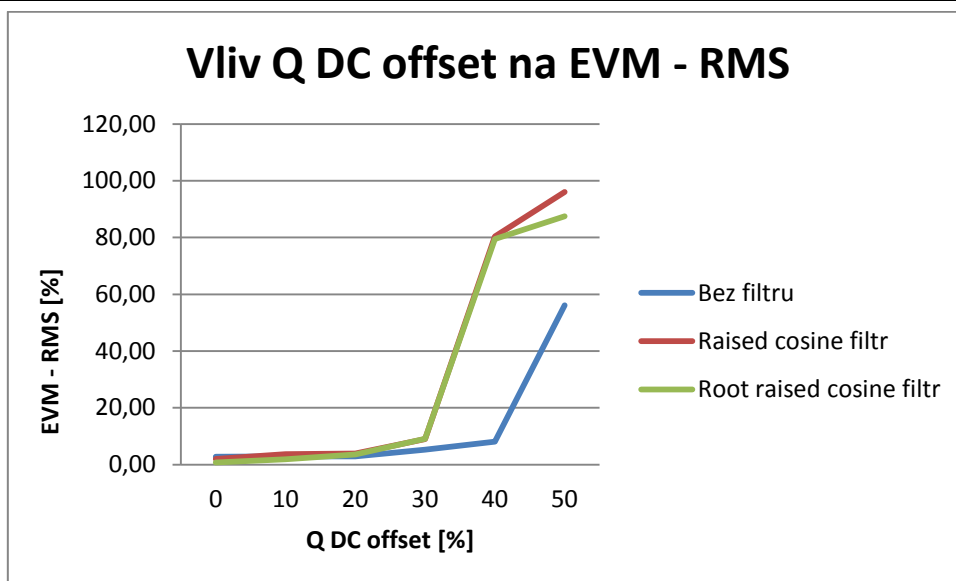
6.7 Měření vlivu Q DC offsetu

V tomto měření jsem zjišťoval vliv Q DC offsetu na parametry MER a EVM při použití Raised cosine a Root raised cosine filtrů a také nefiltrovaného signálu.

Tabulka 6-6: Měření vlivu Q DC offsetu

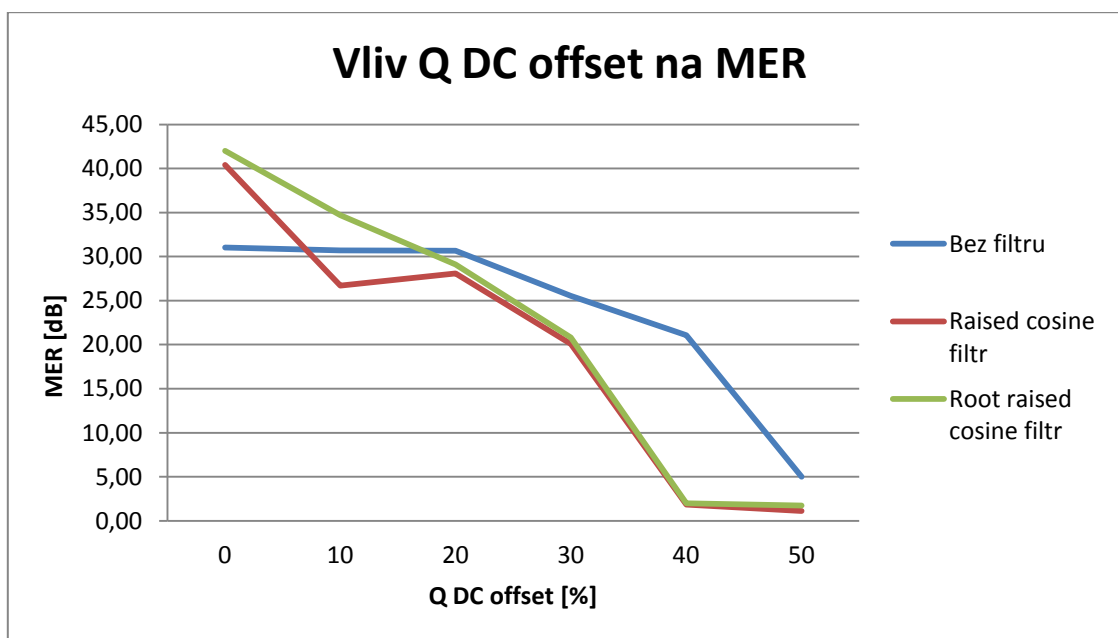
| | Bez filtru | | | Raised cosine filtr | | | Root raised cosine filtr | | |
|-----------------|------------|----------|---------|---------------------|----------|---------|--------------------------|----------|---------|
| | | EVM | | | EVM | | | EVM | |
| Q DC offset [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] |
| 0 | 31,04 | 4,99 | 2,78 | 40,39 | 0,96 | 2,01 | 42,01 | 1,86 | 0,79 |
| 10 | 30,70 | 5,01 | 2,92 | 26,72 | 5,48 | 3,65 | 34,70 | 3,08 | 1,84 |
| 20 | 30,65 | 5,62 | 2,90 | 28,10 | 4,90 | 3,93 | 29,12 | 6,27 | 3,50 |
| 30 | 25,55 | 9,76 | 5,29 | 20,09 | 11,01 | 8,98 | 20,83 | 10,14 | 9,09 |
| 40 | 21,08 | 14,32 | 8,05 | 1,83 | 202,37 | 80,36 | 1,99 | 187,67 | 79,50 |
| 50 | 5,01 | 147,52 | 56,17 | 1,12 | 221,40 | 96,10 | 1,75 | 196,74 | 87,45 |

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.17: Vliv Q DC offset na EVM - RMS

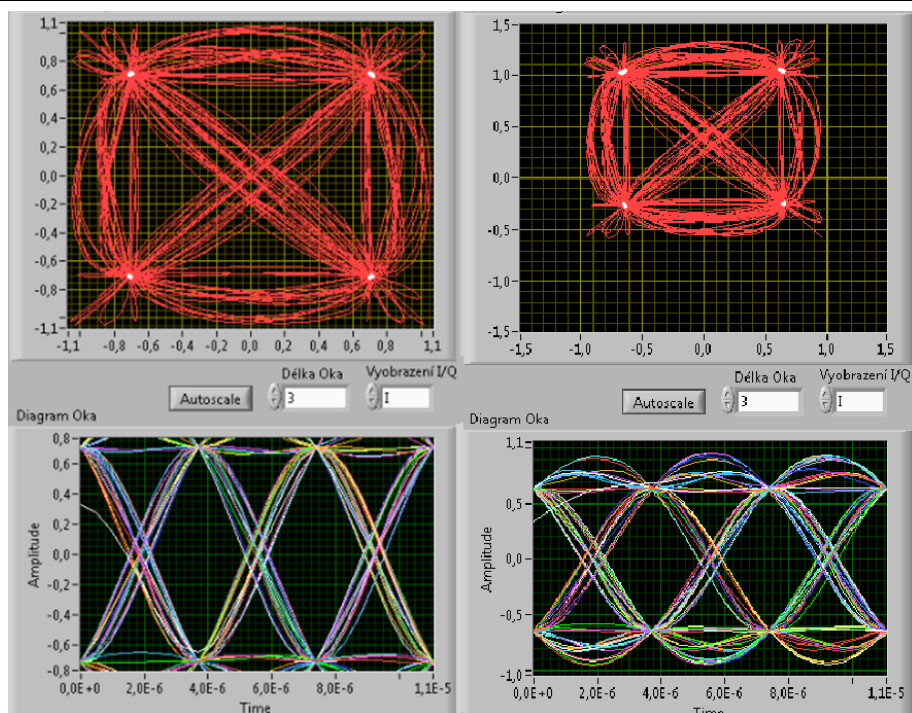
Graf (viz. Obr. 6.17) zobrazuje vliv Q DC offsetu na EVM – RMS. Signál bez použitého filtru vykazoval nejnižší hodnoty EVM – RMS. Hodnota EVM RMS byla 56,17 % při hodnotě 50 % Q DC offsetu. Dokud hodnota Q DC offset nedosáhla 35% vliv na EVM – RMS byl minimální. Signál s použitím filtrem Root raised cosine při maximální hodnotě Q DC je EVM - RMS 87,45 %. Zvyšování chybovosti EVM – RMS začalo u hodnoty Q DC offsetu již na 20 %. Poslední signál, kde byl použit Raised cosine filtr, vykazuje hodnoty EVM – RMS 96,10 %. Zde se projevila chyba Q DC offsetu již při hodnotě 30 %.



Obrázek 6.18: Vliv Q DC offset na MER

Na znázorněném grafu (viz Obr. 6.18) vidíme závislost vlivu Q DC offsetu na MER. Nefiltrovaný signál byl ze všech měřených signálů chybou I DC offsetu ovlivňován nejméně. I když při maximální hodnotě Q DC offsetu je hodnota MER téměř stejná jako u ostatních signálů, tak během zvyšování Q DC offsetu byly hodnoty MER vyšší než u filtrovaných signálů.

Návrh a realizace experimentu s využitím navrženého systému pro analýzu digitálně modulovaného signálu.



Obrázek 6.19: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu Q DC offsetu

Při porovnání diagramů (viz. Obr 6.19) je opět na levé straně signál bez rušení. Q DC offset vyhodnocení posunuje konstelační diagram od ideální polohy směrem nahoru, což snižuje čitelnost a správnost vyhodnocení signálu.

7 Závěr

V prvních kapitolách této diplomové práce jsem popsal teorii týkající se digitálních modulací, degradačních vlivů, digitálních modulací a druhy vyhodnocení vlivu působícího na digitálně modulovaný signál. Dále jsem zde popsal přístroje a nástroje pro analýzu digitálně modulovaného signálu a uvedl blokové schéma pro analýzu digitálně modulovaného signálu.

V praktické části mé diplomové jsem navrhl funkční aplikaci v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW s využitím knihovny Modulation Toolkit pro PXI modulární systém od firmy National Instruments s využitím měřících karet s označením (PXI-5600) a (PXI-5142). Tato aplikace slouží jako vektor signálový analyzátor a umožňuje tak uživateli s použitím PXI modulárního systému měřit různé parametry digitálně modulovaného signálu QPSK stejně jako s klasickou instrumentací určenou pro tuto oblast. Uživatelské prostředí mé aplikace se dělí do tří částí a je navrženo, tak aby se v něm uživatel snadno zorientoval a použití aplikace bylo co nejjednodušší. Tento analyzátor je možné ovládat přes internet s využitím funkce připojení ke vzdálené ploše.

S využitím mnou vytvořené aplikace pracující na reálném PXI modulárním systému jsem navrhl a prováděl reálná měření jednotlivých degradací a zkoumal jejich vliv na kvalitu signálu. Tyto vlivy jsou bílý šum, fázový šum, chyba ortogonalita, I a Q DC offset a nerovnováha zisku. Všechny tyto degradační vlivy byly generovány softwarově aplikací generátoru. Pro jednotlivé měřené degradační vlivy byly zapsány všechny parametry, které aplikace umožňuje, ale do tabulek a jednotlivých grafů jsem uvedl pouze hodnoty MER a EVM, jakožto nejhodnotnější parametry popisující kvalitu digitálně modulovaného systému. Také jsem uvedl příklady konstelačních diagramů a diagramů. Kompletní tabulky jsou uvedeny v přílohách. Rozbor výsledků při měření jednotlivých degradačních vlivů jsem uvedl do šesté kapitoly. Dále jsem zde pozoroval vliv těchto degradací při použití rozdílných filtrů signálu.

V dnešní době jsou digitální modulace používány v mnoha aplikačních oblastech. Použití digitálních modulací vyžaduje neustálá hodnocení a měření kvality signálu. Proto se neustále rozvíjí přístroje a nástroje pro měření digitálně modulovaného signálu a jedna z možných cest, kterým se bude vývoj dále ubírat, je virtuální instrumentace a aplikace, které mohou být podobné aplikaci, jakou jsem vytvořil já v rámci diplomové práce.

Použitá literatura

- [1] PETERKA, Jiří. Druhy přenosu - I. [online]. s. 3 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a98/a844k180.php3>
- [2] HOCHMAN, Radko. Konvergence telekomunikačních a informačních technologií. [online]. s. 5 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.itpoint.cz/voip/?i=konvergence-v-ict-10>
- [3] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. Moderní Radiotechnika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [4] KUNDU, Sudakshina. Analog and Digital Communications. Nové Dillí: Pearson Education, 2010. ISBN 978-81-317-3187-1.
- [5] ŽÍDEK, Jan. Digitální modulace. Ostrava, 2010. Výukový materiál. VŠB - TUO. Vedoucí práce Jan Žídek.
- [6] ANALÝZA DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO ANALYZÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT. MARTÍNEK, Radek. VŠB - TUO. Měření v informačních a komunikačních technologiích [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/martinekradek/teaching>
- [7] SÝKORA, Jan. ČVUT. Teorie digitální komunikace. Dotisk 1. vyd. Praha: ČVUT, 2005, xiii, 329 s. ISBN 80-010-2478-4.
- [8] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 199 s. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [9] ŽÍDEK, Jan. Přístroje na měření chybovosti. Ostrava, 2007. Výukový materiál. VŠB - TUO. Vedoucí práce Jan Žídek.
- [10] Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM) [online]. s. 3 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3652/en>
- [11] VF měřicí technika. HOREVAJ, Michal. Horevaj.com [online]. [cit. 2013-03-18].
- [12] Číslicové osciloskopy [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38smp/SMP-Predn_3tisk.pdf. Výukový materiál. ČVUT.
- [13] ŽÍDEK, Jan. GRAFICKÉ PROGRAMOVÁNÍ VE VÝVOJOVÉM PROSTŘEDÍ LabVIEW [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/FAQ/labview/VI_Skripta.pdf. Výukové skriptum. VŠB - TUO.
- [14] Produkty pro sběrnici PXI s trvalou přenosovou rychlostí 600 MB/s. [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34423

- [15] NATIONAL INSTRUMENTS. Digital Communication System Fundamentals [online]. 2012 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373380A-01/usrphelp/digital_system/
- [16] ŽALUD, Václav. Moderní radioelektronika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 653 s. ISBN 80-860-5647-3.

Seznam obrázku:

| | |
|--|----|
| Obrázek 2.1: Modulační schéma 8-PSK | 6 |
| Obrázek 2.2: I/Q diagram | 6 |
| Obrázek 2.3: Reálná podoba I a Q složky a výsledné kompozitní složky | 7 |
| Obrázek 2.4: I a Q složka v modulaci 8-PSK bez použití filtru | 9 |
| Obrázek 2.5: I a Q složka v modulaci 8-PSK s použitím Root Raised Cosine filtru | 10 |
| Obrázek 2.6: Vektorový diagram GMSK | 10 |
| Obrázek 2.7: Vektorový diagram 8-PSK | 11 |
| Obrázek 2.8: Vektorový diagram 16-QAM | 11 |
| Obrázek 2.9: Zobrazení modulační chyby | 13 |
| Obrázek 2.10: Grafické vyjádření chybového vektoru e | 14 |
| Obrázek 3.1: Diagramy oka pro hodnoty BER 0 a 0,0224 | 18 |
| Obrázek 4.1: Blokové schéma přenosového systému | 21 |
| Obrázek 4.2: Blokové schéma příjmu digitálního signálu vyjádřeno v LabVIEW | 23 |
| Obrázek 4.3: Blok Downconversion | 23 |
| Obrázek 4.4: Blok Demodulation | 23 |
| Obrázek 4.5: Matched Filter | 24 |
| Obrázek 4.6: Blok Equalization | 24 |
| Obrázek 4.7: Channel Decoding | 24 |
| Obrázek 4.8: Blok Constellation Plot | 24 |
| Obrázek 5.1: Blok pro specifikaci modulačního schématu | 25 |
| Obrázek 5.2: Blok pro nastavení parametrů a hardwaru analyzátoru | 26 |
| Obrázek 5.3: Blok pro příjem, měření a demulaci signálu | 27 |
| Obrázek 5.8: Naměřené parametry signálu | 32 |
| Obrázek 5.9: Naměřené parametry signálu a tlačítko stop | 33 |
| Obrázek 6.1: Měřicí soustava | 34 |
| Obrázek 6.3: Vliv bílého šumu na EVM – RMS | 35 |
| Obrázek 6.4: Vliv bílého šumu na MER | 36 |
| Obrázek 6.5: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka | 36 |
| Obrázek 6.6: Vliv fázového šumu na EVM – RMS | 37 |
| Obrázek 6.7: Vliv šumové hustoty na MER | 38 |
| Obrázek 6.8: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu šumové hustoty | 39 |
| Obrázek 6.9: Vliv chyby ortogonality na EVM - RMS | 40 |
| Obrázek 6.10: Vliv chyby ortogonality na MER | 40 |
| Obrázek 6.11: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu chyby ortogonality | 41 |
| Obrázek 6.12: Vliv I DC offsetu na EVM - RMS | 42 |
| Obrázek 6.13: Vliv I DC offsetu na MER | 43 |
| Obrázek 6.14: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu I DC offsetu | 44 |
| Obrázek 6.15: Vliv nerovnováhy zisku na EVM - RMS | 45 |
| Obrázek 6.16: Vliv nerovnováhy zisku na MER | 45 |
| Obrázek 6.17: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu nerovnováhy zisku | 46 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Obrázek 6.19: Vliv Q DC offset na MER</i> | <i>47</i> |
| <i>Obrázek 6.20: Porovnání konstatačního diagramu a diagramu oka při vlivu Q DC offsetu.....</i> | <i>48</i> |

Seznam tabulek:

| | |
|---|------------|
| <i>Tabulka 6.1: Měření vlivu bílého šumu.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabulka 6.2: Měření vlivu šumové hustoty.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabulka 6.3: Měření vlivu chyb ortogonality.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Tabulka 6.4: Měření vlivu I DC offsetu.....</i> | <i>446</i> |
| <i>Tabulka 6.5: Měření vlivu nerovnováhy šumu</i> | <i>44</i> |
| <i>Tabulka 6.6: Měření vlivu Q DC offsetu</i> | <i>46</i> |

Seznam příloh

Příloha A: Obsahuje kompletní tabulky naměřených hodnot při měření degračních vlivů.

Součástí DP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

- analysis_of_digitaly_modulated_signals.vi
- diplomova_prace_LAS129.pdf

Příloha A

Tabulka 1: Naměřené hodnoty vlivu chyby ortogonalit bez použití filtru

| | | EVM | | Chyby signálu | | |
|-------------------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| Chyba ortogonalit [deg] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 31,04 | 4,99 | 2,78 | -6,75 | 10,17 | -176,50 |
| 5 | 25,58 | 9,22 | 5,26 | -4,96 | 16,17 | -110,17 |
| 10 | 20,63 | 13,68 | 9,30 | -8,03 | 4,47 | -17,65 |
| 15 | 17,49 | 17,56 | 13,35 | -6,46 | 22,47 | -140,83 |
| 20 | 15,27 | 22,60 | 17,24 | -8,27 | 2,83 | 47,16 |
| 25 | 13,24 | 26,60 | 21,77 | -11,66 | -2,44 | -104,21 |
| 30 | 11,76 | 31,66 | 25,87 | -8,24 | 15,35 | 136,58 |

Tabulka 2: Naměřené hodnoty vlivu chyby ortogonalit bez použití filtru

| Chyba ortogonalit [deg] | Měření DC offsetu [%] | | | |
|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|-------------------------|
| | I | Q | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalit [deg] |
| 0 | 0,11 | -0,15 | 0,03 | -0,01 |
| 5 | 0,13 | -0,14 | -0,03 | -5,24 |
| 10 | -0,05 | 0,16 | -0,11 | -10,06 |
| 15 | 0,00 | 0,03 | -0,25 | -14,77 |
| 20 | 0,12 | -0,34 | -0,49 | -19,58 |
| 25 | -0,20 | 0,22 | -0,87 | -24,73 |
| 30 | 0,00 | 0,13 | -1,14 | -29,51 |

Tabulka 3: Naměřené hodnoty vlivu chyby ortogonalit s použitím RC filtru

| | | EVM | | Chyby signálu | | |
|-------------------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| Chyba ortogonalit [deg] | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 40,39 | 0,96 | 2,01 | -6,75 | 31,74 | 131,15 |
| 5 | 27,13 | 5,48 | 4,41 | 6,93 | 20,57 | 29,39 |
| 10 | 21,23 | 10,32 | 8,68 | -6,35 | 20,22 | -91,54 |
| 15 | 17,69 | 14,30 | 13,34 | -5,50 | -2,24 | -57,56 |
| 20 | 15,21 | 18,73 | 17,36 | -5,90 | -0,02 | -168,22 |
| 25 | 13,33 | 25,03 | 21,35 | -6,01 | 29,45 | -127,46 |
| 30 | 11,78 | 28,90 | 25,37 | -4,84 | 13,56 | -19,43 |

Tabulka 4: Naměřené hodnoty vlivu chyby ortogonalit s použitím RC filtru

| Chyba ortogonalit [deg] | Měření DC offsetu [%] | | | |
|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|-------------------------|
| | I | Q | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalit [deg] |
| 0 | 0,00 | -0,02 | -0,01 | -0,04 |
| 5 | -0,02 | 0,00 | -0,03 | -4,96 |
| 10 | -0,06 | 0,01 | -0,13 | -9,91 |
| 15 | 0,00 | -0,01 | -0,29 | -14,88 |
| 20 | 0,00 | 0,01 | -0,53 | -19,92 |
| 25 | -0,02 | -0,03 | -0,80 | -24,89 |
| 30 | 0,04 | -0,01 | -1,19 | -29,94 |

Tabulka 5: Naměřené hodnoty vlivu chyby ortogonalit s použitím RRC filtru

| Chyba ortogonalit [deg] | EVM | | | Chyby signálu | | |
|-------------------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 42,01 | 1,86 | 0,79 | -8,58 | 10,14 | -109,27 |
| 5 | 27,10 | 5,12 | 4,41 | 8,94 | 19,46 | 155,54 |
| 10 | 21,16 | 10,17 | 8,75 | -5,33 | 42,45 | 60,34 |
| 15 | 17,65 | 14,81 | 13,11 | -6,84 | 25,32 | -100,87 |
| 20 | 15,80 | 22,60 | 17,63 | -5,70 | 29,74 | 122,65 |
| 25 | 13,45 | 25,75 | 21,77 | -5,17 | 32,50 | -171,16 |
| 30 | 11,90 | 30,60 | 25,32 | -1,34 | -1,23 | 102,73 |

Tabulka 6: Naměřené hodnoty vlivu chyby ortogonalit s použitím RRC filtru

| Chyba ortogonalit [deg] | Měření DC offsetu [%] | | | |
|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|-------------------------|
| | I | Q | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalit [deg] |
| 0 | -0,01 | -0,03 | -0,01 | -0,02 |
| 5 | 0,10 | 0,05 | -0,03 | -4,97 |
| 10 | 0,06 | 0,10 | -0,12 | -9,95 |
| 15 | 0,01 | -0,02 | -0,30 | -14,92 |
| 20 | 0,16 | -0,11 | -0,58 | -19,84 |
| 25 | 0,03 | -0,03 | -0,82 | -24,78 |
| 30 | 0,04 | 0,05 | -1,14 | -29,34 |

Tabulka 7: Naměřené hodnoty vlivu I DC offsetu bez použití filtru

| I DC offset [%] | EVM | | | Chyby signálu | | |
|-----------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 31,04 | 4,99 | 2,78 | -6,75 | 10,17 | -176,5 |
| 10 | 30,96 | 5,41 | 2,74 | -1,93 | 6,61 | 127,04 |
| 20 | 29,04 | 6,4 | 3,53 | -5,22 | -43,1 | -46,35 |
| 30 | 26,29 | 9,45 | 4,85 | -1793 | -4,66 | -21,6 |
| 40 | 24,16 | 9,91 | 6,2 | -11,01 | 49,36 | 136,72 |
| 50 | 2,75 | 192,1 | 72,9 | -7335,24 | -540,03 | 141,32 |

Tabulka 8: Naměřené hodnoty vlivu I DC offsetu bez použití filtru

| I DC offset [%] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita |
|-----------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------|
| | I | Q | | |
| 0 | 0,11 | -0,15 | 0,03 | -0,01 |
| 10 | 10,21 | 0,1 | -0,06 | -0,05 |
| 20 | 20,33 | -0,17 | -0,17 | -0,03 |
| 30 | 29,02 | 0,11 | 0,84 | 0,47 |
| 40 | 39,06 | 0,19 | 0,82 | 0,22 |
| 50 | 1,66 | -2,91 | -2,34 | -1,89 |

Tabulka 9: Naměřené hodnoty vlivu I DC offsetu s použitím RC filtru

| I DC offset [%] | EVM | | | Chyby signálu | | |
|-----------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 40,39 | 0,96 | 2,01 | -6,75 | 31,74 | 131,15 |
| 10 | 34,22 | 3,46 | 1,95 | -10,30 | 66,40 | 136,42 |
| 20 | 26,23 | 8,30 | 4,83 | -10,77 | -5,29 | -121,18 |
| 30 | 21,28 | 14,34 | 8,63 | 23,81 | 56,53 | 161,01 |
| 40 | 5,41 | 109,05 | 53,67 | 530,74 | -191,26 | -52,54 |
| 50 | 1,17 | 178,45 | 98,78 | - | - | - |

Tabulka 10: Naměřené hodnoty vlivu I DC offsetu s použitím RC filtru

| I DC offset [%] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita [deg] |
|-----------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| 0 | 0,00 | -0,02 | -0,01 | -0,04 |
| 10 | 14,54 | -0,04 | 0,01 | 0,08 |
| 20 | 20,34 | 0,00 | 0,03 | -0,03 |
| 30 | 30,56 | -0,01 | -0,04 | 0,09 |
| 40 | 9,79 | 12,20 | 13,48 | 0,38 |
| 50 | - | - | - | - |

Tabulka 11: Naměřené hodnoty vlivu I DC offsetu s použitím RRC filtru

| I DC offset [%] | EVM | | | Chyby signálu | | |
|-----------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 42,01 | 1,86 | 0,79 | -8,58 | 10,14 | -109,27 |
| 10 | 16,55 | 26,54 | 14,30 | -4,04 | -11,15 | 79,35 |
| 20 | 16,25 | 28,77 | 15,89 | -11,36 | 61,61 | -31,39 |
| 30 | 15,80 | 30,12 | 17,35 | 6,34 | 39,41 | 64,79 |
| 40 | 1,27 | 100,98 | 86,73 | -2225,60 | 1907,50 | -55,97 |
| 50 | 1,14 | 145,74 | 95,12 | - | - | - |

Tabulka 12: Naměřené hodnoty vlivu I DC offsetu s použitím RRC filtru

| I DC offset [%] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonality [deg] |
|-----------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| 0 | -0,01 | -0,03 | -0,01 | -0,02 |
| 10 | 11,72 | 0,34 | -0,04 | 2,34 |
| 20 | 24,40 | 0,53 | 0,01 | -1,14 |
| 30 | 35,11 | 0,17 | -0,20 | -0,26 |
| 40 | 2,55 | -1,30 | -0,74 | 9,80 |
| 50 | - | - | - | - |

Tabulka 13: Naměřené hodnoty vlivu nerovnováhy zisku bez použití filtru

| nerovnováha zisku [dB] | EVM | | | Chyby signálu | | |
|------------------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 31,04 | 4,99 | 2,78 | -6,75 | 10,17 | -176,50 |
| 1 | 23,72 | 11,06 | 6,52 | -6,87 | -1,46 | -5,53 |
| 2 | 18,77 | 18,49 | 11,52 | 1,28 | 12,64 | 11,28 |
| 3 | 15,25 | 23,17 | 17,27 | -3,81 | -46,13 | -65,10 |
| 4 | 12,98 | 30,78 | 22,48 | -23,57 | 37,50 | -89,70 |
| 5 | 11,32 | 36,73 | 27,16 | -20,57 | -201,10 | -102,90 |
| 6 | 9,92 | 37,65 | 31,90 | -4,42 | -11,38 | 149,79 |

Tabulka 14: Naměřené hodnoty vlivu nerovnováhy zisku bez použití filtru

| nerovnováha zisku [dB] | Měření DC offsetu [%] | | | |
|------------------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------|
| | I | Q | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita |
| 0 | 0,11 | -0,15 | 0,03 | -0,01 |
| 1 | 0,14 | -0,03 | 0,30 | 0,18 |
| 2 | -0,27 | 0,16 | 1,96 | 0,06 |
| 3 | 0,20 | -0,24 | 3,03 | 0,15 |
| 4 | 0,08 | 0,06 | 3,99 | -0,28 |
| 5 | 0,02 | 0,01 | 4,94 | -0,10 |
| 6 | -0,07 | -0,05 | 5,98 | -0,21 |

Tabulka 15: Naměřené hodnoty vlivu nerovnováhy zisku při použití RC filtru

| nerovnováha zisku [dB] | | EVM | | Chyby signálu | | |
|------------------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 42,01 | 1,86 | 0,79 | -8,58 | 10,14 | -109,27 |
| 1 | 24,75 | 7,92 | 5,79 | -2,31 | 25,89 | 149,67 |
| 2 | 18,84 | 14,13 | 11,43 | -0,03 | 45,21 | -132,11 |
| 3 | 15,45 | 21,47 | 16,88 | 5,89 | -25,39 | 48,47 |
| 4 | 13,08 | 24,72 | 22,19 | -7,72 | -27,26 | 105,03 |
| 5 | 11,37 | 34,63 | 27,02 | -22,08 | -151,87 | 17,48 |
| 6 | 9,94 | 36,87 | 31,84 | -8,96 | -26,42 | -150,86 |

Tabulka 16: Naměřené hodnoty vlivu nerovnováhy zisku při použití RC filtru

| nerovnováha zisku [dB] | Měření DC offsetu [%] | | | |
|------------------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita [deg] |
| 0 | -0,01 | -0,03 | -0,01 | -0,02 |
| 1 | 0,02 | -0,02 | 1,00 | 0,03 |
| 2 | 0,01 | 0,03 | 2,00 | 0,00 |
| 3 | -0,05 | -0,10 | 2,98 | 0,12 |
| 4 | -0,03 | 0,02 | 4,00 | 0,01 |
| 5 | -0,18 | 0,08 | 4,94 | 0,14 |
| 6 | -0,03 | -0,08 | 5,99 | 0,02 |

Tabulka 17: Naměřené hodnoty vlivu nerovnováhy zisku při použití RRC filtru

| nerovnováha zisku [dB] | EVM | | | Chyby signálu | | |
|---------------------------|-------------|-------------|------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 42,01 | 1,86 | 0,79 | -8,58 | 10,14 | -109,27 |
| 1 | 24,89 | 7,31 | 5,70 | -4,44 | -0,15 | -166,60 |
| 2 | 18,91 | 11,34 | 12,95 | -9,53 | -31,39 | 147,52 |
| 3 | 15,29 | 21,85 | 17,20 | -4,39 | -58,19 | 18,18 |
| 4 | 13,09 | 25,74 | 22,17 | -8,40 | 140,62 | -67,68 |
| 5 | 11,31 | 31,70 | 27,20 | -1,82 | 108,24 | 100,40 |
| 6 | 10,04 | 44,69 | 31,48 | -3,53 | -153,30 | -55,46 |

Tabulka 18: Naměřené hodnoty vlivu nerovnováhy zisku při použití RRC filtru

| nerovnováha zisku [dB] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonality [deg] |
|------------------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| 0 | -0,01 | -0,03 | -0,01 | -0,02 |
| 1 | -0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,01 |
| 2 | -0,05 | 0,02 | 1,98 | 0,04 |
| 3 | -0,30 | 0,05 | 9,96 | -0,48 |
| 4 | -0,01 | -0,01 | -4,00 | 0,02 |
| 5 | 0,05 | 0,00 | 5,01 | -0,10 |
| 6 | -0,01 | 0,03 | 5,84 | 0,14 |

Tabulka 19: Naměřené hodnoty vlivu Q DC offsetu bez použití filtru

| Q DC offset [%] | EVM | | | Chyby signálu | | |
|-----------------|-------------|----------|------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 31,04 | 4,99 | 2,78 | -6,75 | 10,17 | -176,50 |
| 10 | 30,70 | 5,01 | 2,92 | -11,79 | -10,56 | 93,46 |
| 20 | 30,65 | 5,62 | 2,90 | -12,40 | -20,70 | -67,93 |
| 30 | 25,55 | 9,76 | 5,29 | 11,23 | 109,23 | -140,83 |
| 40 | 21,08 | 14,32 | 8,05 | -22,65 | 140,15 | 29,78 |
| 50 | 5,01 | 147,52 | 56,17 | -5136,00 | 1102,31 | 80,92 |

Tabulka 20: Naměřené hodnoty vlivu Q DC offsetu bez použití filtru

| Q DC offset [%] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita |
|-----------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------|
| | I | Q | | |
| 0 | 0,11 | -0,15 | 0,03 | -0,01 |
| 10 | 0,26 | 10,25 | -0,03 | -0,10 |
| 20 | 0,30 | 20,41 | -0,01 | -0,16 |
| 30 | -0,03 | 29,76 | 0,10 | 0,11 |
| 40 | 0,06 | 30,62 | 0,06 | -0,36 |
| 50 | 0,45 | -5,50 | -1,14 | 0,67 |

Tabulka 21: Naměřené hodnoty vlivu Q DC offsetu s použitím RC filtru

| Q DC offset [deg] | MER [dB] | EVM | | Chyby signálu | | |
|-------------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 40,39 | 0,96 | 2,01 | -6,75 | 31,74 | 131,15 |
| 10 | 26,72 | 5,48 | 3,65 | 3,10 | 23,80 | 65,09 |
| 20 | 28,10 | 4,90 | 3,93 | -8,63 | 47,02 | 49,11 |
| 30 | 20,09 | 11,01 | 8,98 | -6,72 | 57,59 | 37,16 |
| 40 | 1,83 | 202,37 | 80,36 | -804,03 | 2526,04 | -79,31 |
| 50 | 1,12 | 221,40 | 96,10 | - | - | - |

Tabulka 22: Naměřené hodnoty vlivu Q DC offsetu s použitím RC filtru

| Q DC offset [deg] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita [deg] |
|-------------------|-----------------------|--------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| 0 | 0,00 | -0,02 | -0,01 | -0,04 |
| 10 | 0,16 | 14,65 | -0,03 | 0,13 |
| 20 | 0,03 | 20,44 | -0,01 | -0,14 |
| 30 | 0,03 | 39,39 | 0,00 | -0,03 |
| 40 | -12,37 | -10,70 | -1,86 | 13,06 |
| 50 | - | - | - | - |

Tabulka 23: Naměřené hodnoty vlivu Q DC offsetu s použitím RRC filtru

| Q DC offset | MER [dB] | EVM | | Chyby signálu | | |
|-------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 0 | 42,01 | 1,86 | 0,79 | -8,58 | 10,14 | -109,27 |
| 10 | 34,70 | 3,08 | 1,84 | -9,72 | -39,27 | 169,06 |
| 20 | 29,12 | 6,27 | 3,50 | -21,84 | 42,90 | 11,46 |
| 30 | 20,83 | 10,14 | 9,09 | -15,28 | -34,19 | -67,95 |
| 40 | 1,99 | 187,67 | 79,50 | -874,73 | -856,06 | -33,56 |
| 50 | 1,75 | 196,74 | 87,45 | - | - | - |

Tabulka 24: Naměřené hodnoty vlivu Q DC offsetu s použitím RRC filtru

| Q DC offset | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonality [deg] |
|-------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| 0 | -0,01 | -0,03 | -0,01 | -0,02 |
| 10 | 0,00 | 13,99 | 0,00 | 0,03 |
| 20 | -0,05 | 27,59 | 0,00 | 0,05 |
| 30 | 0,01 | 38,93 | -0,01 | -0,01 |
| 40 | -9,15 | -8,41 | -1,40 | -28,87 |
| 50 | - | - | - | - |

Tabulka 25: Naměřené hodnoty vlivu Bílého šumu bez použití filtru

| Eb/NO [dB] | MER [dB] | EVM | | chyby signálu | | |
|------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 100 | 31,04 | 5,22 | 2,74 | -7,02 | 20,66 | -22,12 |
| 90 | 31,22 | 5,38 | 2,75 | -1,89 | 6,53 | -103,95 |
| 80 | 31,19 | 5,53 | 2,76 | -6,55 | 4,44 | 95,08 |
| 70 | 31,15 | 2,77 | 4,96 | -5,62 | -8,81 | -98,72 |
| 60 | 31,06 | 2,8 | 4,91 | -6,11 | 27,7 | -132,45 |
| 50 | 31,19 | 2,76 | 5,24 | -3,63 | 21,15 | -123,62 |
| 40 | 30,38 | 3,03 | 5,44 | -6,71 | 21,15 | -80,07 |
| 30 | 27,149 | 4,37 | 11,49 | -9,91 | -6,14 | 130,4 |
| 20 | 19,52 | 10,56 | 26,35 | 0,84 | -9,48 | -147,57 |
| 10 | 6,76 | 45,91 | 113,08 | -172,72 | -9,49 | 8,23 |
| 0 | 0,41 | 95,35 | 179,65 | 1445,55 | 1375,99 | -120,83 |

Tabulka 26: Naměřené hodnoty vlivu Bílého šumu bez použití filtru

| Eb/NO [dB] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | chyba ortogonality (deg) |
|------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| 100 | 0,05 | 0,14 | -0,01 | -0,07 |
| 90 | -0,1 | 0,19 | -0,02 | -0,18 |
| 80 | 0,07 | -0,07 | -0,03 | 0,1 |
| 70 | -0,15 | 0,19 | 0,02 | 0,16 |
| 60 | -0,15 | -0,15 | 0,04 | 0,1 |
| 50 | 0,1 | 0,07 | -0,02 | 0,01 |
| 40 | -0,04 | -0,05 | 0 | 0,16 |
| 30 | 0,26 | -0,24 | 0,05 | 0,16 |
| 20 | -0,35 | 0,97 | -0,07 | -0,61 |
| 10 | 1,94 | -3,2 | -0,37 | 3,93 |
| 0 | 4,37 | 2,77 | 0,51 | 14,79 |

Tabulka 27: Naměřené hodnoty vlivu Bílého šumu při použití RC filtru

| Eb/NO [dB] | | EVM | | chyby signálu | | |
|---------------|-------------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 100 | 40,39 | 2,01 | 0,96 | -6,75 | 31,6 | 131,15 |
| 90 | 40,6 | 2,23 | 0,93 | -8,18 | 13,83 | 17,12 |
| 80 | 41,71 | 1,94 | 0,82 | -6,98 | 17,34 | 58,5 |
| 70 | 41,39 | 2 | 0,85 | -9,45 | 2,85 | 18,83 |
| 60 | 42,27 | 1,67 | 0,77 | -7,3 | -1,67 | 19,36 |
| 50 | 41,82 | 2,05 | 0,81 | -11,49 | 1,52 | 119,35 |
| 40 | 36,3 | 4,22 | 1,53 | -7,85 | 25,29 | 44,4 |
| 30 | 28,61 | 9 | 3,71 | -10,37 | 24,43 | -66,47 |
| 20 | 18,21 | 32,75 | 12,29 | -9,78 | -37,46 | -113,67 |
| 10 | 8,93 | 100,58 | 35,77 | -14,38 | 113,45 | -94,19 |
| 0 | 3,49 | 178,15 | 66,9 | 4291,29 | 1444,55 | -211,73 |

Tabulka 28: Naměřené hodnoty vlivu Bílého šumu při použití RC filtru

| Eb/NO [dB] | Měření DC offsetu [%] | | | |
|------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | nerovnováha zisku [dB] | chyba ortogonality (deg) |
| 100 | -0,03 | -0,03 | -0,01 | 0,04 |
| 90 | -0,03 | 0,02 | -0,01 | -0,01 |
| 80 | 0,03 | -0,04 | -0,01 | 0,03 |
| 70 | -0,02 | -0,03 | 0 | 0,01 |
| 60 | 0,07 | -0,02 | 0,01 | 0,03 |
| 50 | 0,04 | 0,05 | 0,01 | -0,09 |
| 40 | -0,12 | 0 | 0 | 0,02 |
| 30 | 0,23 | 0,17 | 0,01 | -0,09 |
| 20 | 0,08 | 0,13 | -0,09 | 1,91 |
| 10 | -0,28 | 0,02 | 0,01 | 2,25 |
| 0 | 0,85 | -5,48 | 0,66 | -6,1 |

Tabulka 29: Naměřené hodnoty vlivu Bílého šumu při použití RRC filtru

| Eb/NO [dB] | chyby signálu | | | | | |
|---------------|---------------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| 100 | 42,01 | 1,86 | 0,79 | -8,58 | 10,14 | -109,27 |
| 90 | 39,23 | 2,65 | 1,09 | -4,22 | 30,01 | 107,1 |
| 80 | 41,01 | 2,16 | 0,89 | -9,18 | 28,86 | 106,94 |
| 70 | 43,29 | 1,51 | 0,68 | -3,94 | -1,8 | -132,04 |
| 60 | 41,67 | 1,72 | 0,82 | -5,75 | -6,91 | 19,54 |
| 50 | 41,63 | 2,15 | 0,83 | -4,06 | 13,21 | 13,28 |
| 40 | 37,45 | 3,03 | 1,34 | -6,36 | -11,91 | 65,42 |
| 30 | 29,08 | 8,09 | 3,52 | -6,43 | 18,49 | -87,9 |
| 20 | 20,56 | 22,25 | 9,38 | -4,88 | -37,7 | 163,05 |
| 10 | 10,35 | 90,09 | 30,37 | 7,31 | 128,89 | 88,99 |
| 0 | 4,41 | 139,01 | 60,21 | -69,62 | 416,47 | -69,62 |

Tabulka 30: Naměřené hodnoty vlivu Bílého šumu při použití RRC filtru

| Eb/NO [dB] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | chyba ortogonality (deg) |
|------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| 100 | -0,01 | 0,03 | -0,01 | -0,03 |
| 90 | -0,02 | 0,01 | 0 | 0,01 |
| 80 | 0,02 | -0,01 | 0,02 | -0,02 |
| 70 | 0,04 | -0,03 | 0 | -0,03 |
| 60 | 0,05 | -0,01 | -0,01 | -0,03 |
| 50 | 0 | 0,01 | 0 | 0,01 |
| 40 | -0,04 | 0,09 | 0 | -0,15 |
| 30 | 0,13 | 0,37 | -0,06 | -0,18 |
| 20 | -0,25 | 0,85 | -0,01 | 0,27 |
| 10 | 0,4 | -2,97 | 0,07 | -0,63 |
| 0 | -0,81 | -2,3 | 0,09 | 8,79 |

Tabulka 31: Naměřené hodnoty vlivu Šumové hustoty bez použití filtru

| Šumová hustota [dBc/Hz] | chyby signálu | | | | | |
|----------------------------|---------------|-------------|------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| -120 | 30,56 | 7,34 | 2,96 | -17,74 | 17,87 | 176,09 |
| -115 | 30,11 | 6,78 | 3,12 | -12,07 | -21,79 | 148,23 |
| -110 | 29 | 6,82 | 3,55 | -3,37 | 34,72 | -78,92 |
| -105 | 28,77 | 8,94 | 3,64 | -24,41 | 66,68 | -119,8 |
| -100 | 26,76 | 11,57 | 4,59 | -22,91 | 69,45 | 8,29 |
| -95 | 20,5 | 35,04 | 9,44 | 202,67 | 220,18 | 99,83 |
| -90 | 17,51 | 35,91 | 13,32 | 255,94 | 125,15 | -10,51 |
| -85 | 9,32 | 72,46 | 34,19 | -395,5 | 391,19 | 90,45 |
| -80 | 7,11 | 118,7 | 44,09 | 42,76 | 1360,72 | -64,42 |

Tabulka 32: Naměřené hodnoty vlivu Šumové hustoty bez použití filtru

| Šumová hustota [dBc/Hz] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita [deg] |
|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| -120 | 0,01 | -0,07 | -0,03 | 0,29 |
| -115 | 0,17 | 0,04 | 0,04 | 0,32 |
| -110 | 0,04 | 0,26 | 0,04 | -0,38 |
| -105 | 0,12 | -0,13 | 0,02 | -0,28 |
| -100 | -0,5 | 0,08 | -0,02 | 0,49 |
| -95 | 0,04 | 0,04 | -0,05 | 0,36 |
| -90 | -0,33 | 0,31 | 0,24 | 0,36 |
| -85 | -2,93 | 0,57 | 0,96 | 1,36 |
| -80 | 0,04 | -0,14 | -0,58 | -1,55 |

Tabulka 33: Naměřené hodnoty vlivu Šumové hustoty při použití RC filtru

| Šumová hustota [dBc/Hz] | MER [dB] | EVM | | chyby signálu | | |
|-------------------------|----------|----------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| | | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| -120 | 40,76 | 2,03 | 0,92 | -5,87 | 11,54 | 165,53 |
| -115 | 35,31 | 4,02 | 1,72 | -14,22 | 4,03 | 6,24 |
| -110 | 30,85 | 5,71 | 2,87 | -0,24 | 123,6 | 83,07 |
| -105 | 33,25 | 5,11 | 2,17 | -21,95 | -32,54 | -86,64 |
| -100 | 27,87 | 11,49 | 4,04 | -81,49 | 131,61 | 67,22 |
| -95 | 19,72 | 23,51 | 10,33 | 48,5 | -154,42 | 31,62 |
| -90 | 14,39 | 46,34 | 19,08 | -117,73 | -474,07 | 72,09 |
| -85 | 11,63 | 64,08 | 26,21 | -3,82 | 564,71 | -186,06 |
| -80 | 4,46 | 167,76 | 59,83 | 146,48 | 1531,32 | 156,32 |

Tabulka 34: Naměřené hodnoty vlivu Šumové hustoty při použití RC filtru

| Šumová hustota [dBc/Hz] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita [deg] |
|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| -120 | 0,03 | 0,03 | 0 | -0,06 |
| -115 | -0,08 | -0,01 | 0,03 | 0,08 |
| -110 | -0,19 | -0,07 | 0,02 | 0,18 |
| -105 | -0,17 | -0,11 | -0,01 | 0,28 |
| -100 | 0,19 | -0,01 | -0,01 | -0,19 |
| -95 | -0,24 | -1,19 | -0,11 | 1,35 |
| -90 | 1,08 | -0,03 | 0 | -0,66 |
| -85 | 1,78 | -0,64 | 0,36 | -1,42 |
| -80 | -1,52 | 2,84 | -1,34 | 0,3 |

Tabulka 35: Naměřené hodnoty vlivu Šumové hustoty při použití RC filtru

| Šumová hustota [dBc/Hz] | EVM | | | chyby signálu | | |
|----------------------------|-------------|-------------|------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| | MER [dB] | Peak [%] | RMS [%] | frekvenční offset [Hz] | frekvenční drift [Hz] | Fázový offset [deg] |
| -120 | 38,77 | 2,97 | 1,15 | 3,99 | -53,78 | 50,51 |
| -115 | 35,36 | 5,48 | 1,71 | 5,52 | 48,31 | -93,24 |
| -110 | 37,16 | 4,07 | 1,39 | 6,69 | 1,14 | -59,36 |
| -105 | 30,43 | 7,64 | 3,01 | 9,31 | -107,86 | 113,27 |
| -100 | 26,28 | 17,47 | 4,85 | 25,31 | -88,27 | -118 |
| -95 | 21,82 | 21,51 | 8,11 | -16,39 | -64,45 | -45,64 |
| -90 | 10,11 | 68,21 | 31,21 | -331,53 | 1140,3 | -139,5 |
| -85 | 9 | 98,87 | 35,5 | -312,91 | -1556,62 | -44,444 |
| -80 | 2,07 | 174,76 | 78,76 | 1809,04 | -748,77 | 71,97 |

Tabulka 36: Naměřené hodnoty vlivu Šumové hustoty při použití RC filtru

| Šumová hustota [dBc/Hz] | Měření DC offsetu [%] | | nerovnováha zisku [dB] | Chyba ortogonalita [deg] |
|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|--------------------------|
| | I | Q | | |
| -120 | -0,05 | -0,02 | -0,03 | 0,03 |
| -115 | 0,02 | -0,09 | 0,01 | 0,05 |
| -110 | -0,02 | -0,01 | 0,01 | 0,04 |
| -105 | 0,05 | 0 | 0,02 | -0,08 |
| -100 | 0,18 | -0,16 | 0,04 | -0,08 |
| -95 | 0,24 | 0,16 | 0,04 | -0,32 |
| -90 | 1,61 | 1,18 | -0,05 | -1,15 |
| -85 | 1,54 | 0,75 | 0 | -0,39 |
| -80 | -1,76 | 1,14 | -1,05 | -4,94 |